



Vers une nouvelle Interaction Homme Environnement dans les jeux vidéo et pervasifs : rétroaction biologique et états émotionnels : apprentissage profond non supervisé au service de l'affectique

Viviane Gal

► To cite this version:

Viviane Gal. Vers une nouvelle Interaction Homme Environnement dans les jeux vidéo et pervasifs : rétroaction biologique et états émotionnels : apprentissage profond non supervisé au service de l'affectique. Interface homme-machine [cs.HC]. Conservatoire national des arts et métiers - CNAM, 2019. Français. NNT : 2019CNAM1269 . tel-02477340v2

HAL Id: tel-02477340

<https://theses.hal.science/tel-02477340v2>

Submitted on 4 Mar 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

École Doctorale Informatique, Télécommunications et Électronique (Paris)

Centre d'Études et de Recherche en Informatique et Communications (CEDRIC)

THÈSE présentée par :

Viviane GAL

soutenue le : **9 décembre 2019**

pour obtenir le grade de : **Docteur du Conservatoire National des Arts et Métiers**

Discipline/ Spécialité : Informatique

**Vers une nouvelle Interaction Homme Environnement dans
les jeux vidéo et pervasifs : rétroaction biologique et états
émotionnels**

Apprentissage profond non supervisé au service de l'affectique

THÈSE dirigée par :

Monsieur GRESSIER-SOUDAN Eric

Professeur des universités, Conservatoire National des Arts et
Métiers

RAPPORTEURS :

Monsieur TIJUS Charles

Président du jury, Professeur des universités, Université Paris 8,
directeur du Laboratoire Cognitions Humaine et Artificielle
(CHArt)

Monsieur HEUDIN Jean-Claude

Chercheur en Intelligence Artificielle, Artificial-Creature.com

JURY :

Monsieur CUBAUD Pierre

Professeur des universités, Conservatoire National des Arts et
Métiers

Madame METAIS Elisabeth

Professeur des universités, Conservatoire National des Arts et
Métiers

Madame PESTY Sylvie

Professeur des universités, Université Grenoble Alpes,
groupe systèmes Interactifs et Cognitifs, équipe HAwAI
(Human Aware Artificial Intelligence)

INVITE :

Monsieur BADRAN Fouad

Professeur des Universités émérite, Conservatoire National des
Arts et Métiers

A mon très cher et super *Papa, René Gal*. « Tu n'es plus là où tu étais, mais tu es là où je suis » Victor Hugo. Merci pour tout ce que tu m'as transmis comme un peu de ton courage, de ta curiosité et de ton ingéniosité.

A *Alexandre Topol*. J'aurais aimé que tu sois là. Ces travaux ont commencé ensemble avec PLUG et notre groupe d'affective computing. Ton esprit vif, ton intelligence et ton humour me manquent.

A *Carole Bouchard* qui aurait dû être avec nous. Merci pour tous les bons conseils.

Remerciements

La thèse est vraiment une aventure tant du point de vue de l'exploration scientifique que dans la réflexion sur soi. C'est un apprentissage profond. Ainsi, une page se tourne mais le livre n'est pas terminé. C'est un ravissement et aussi un soulagement. L'exercice est passionnant et fastidieux à la fois. Ce travail n'est pas un travail solitaire même si à de maints moments l'impression d'exil est là. Il est le fruit d'intuitions, de présences insoupçonnées, de contacts spirituels, de rencontres et d'échanges, encouragé et formalisé par la passion pour transmission. Ils m'accompagnent et me guident chaque jour. En cela, j'ai quelques messages à formuler.

Lister et remercier tout le monde est du domaine de l'utopie. Que ceux qui n'apparaissent pas dans ces quelques lignes me pardonnent. Je sais qu'ils étaient là. Je leur dis MERCI.

Je remercie également tous les participants aux expérimentations. C'est grâce à leurs données que cette étude a été possible.

Je remercie infiniment tous les êtres qui ont croisé mon chemin quels qu'ils soient, ils m'ont tous fait réfléchir, m'ont permis de me remettre en question donc de progresser. Ils m'ont également inspirée, entraînée et éclairée.

Monsieur le professeur *Eric Gressier-Soudan* m'a dirigée lorsque j'ai préparé mon diplôme d'ingénieur en informatique et c'est tout naturellement que je me suis tournée vers lui lorsque j'ai décidé d'entamer une thèse. Il s'agissait d'un sujet personnel qui me tenait à cœur. Je n'envisageais aucune autre personne qu'Eric pour m'accompagner dans cette démarche. J'aimais la façon dont nous avons travaillé ensemble. Eric est très attaché à l'humain Je connaissais ses qualités. Ce n'était pas gagné mais il a accepté. Eric en tant que directeur de thèse est un encadrant atypique pour doctorants atypiques, les laissant très libres de leurs activités et de leurs choix tout en pointant du doigt les écueils et faisant émerger le meilleur de chacun. Je remercie Eric pour tout, en particulier, de m'avoir laissé toute latitude. La thèse nous a menés vers des destinations inconnues, inattendues. Malgré toutes les difficultés rencontrées, le résultat est là. Nos discussions ont été instructives. Tu es encore plus un grand quelque'un 😊.

J'ai dévoré les ouvrages de *Jean-Claude Heudin*. Ils m'ont éclairée sur l'intelligence artificielle, les robots, le deep learning ... d'une façon simple et facile alors que les domaines sont complexes. Au cours de discussions avec mon très cher ami, *Michel Béra*, j'ai évoqué ces livres et son auteur.

Et là, les choses ont basculé. Michel m'a incitée à le contacter. Ce que j'ai fait. C'est donc pour moi un moment privilégié et un grand honneur que Monsieur Jean-Claude Heudin ait accepté de rapporter sur mon travail et de participer à la soutenance. Je vous dis un grand merci.

C'est un honneur et un réel bonheur que Monsieur le professeur *Charles Tijus*, dans sa grande bonté, rapporte sur la thèse et prenne part à la présentation. Je suis à la fois fascinée par ses ressources, sa perception et j'admire cette personne si joviale, si ouverte. C'est un vrai plaisir que de le côtoyer et j'en suis fière. Merci Charles.

Madame le professeur *Sylvie Pesty*, c'est un grand honneur de vous compter parmi les membres de mon jury. Je ne sais comment vous remercier d'avoir consenti à participer à cet événement d'autant plus que vous avez déplacé vos activités pour se faire. Je suis votre obligée, merci.

Je remercie Madame le professeur *Elisabeth Métais* de participer au jury de ma thèse. Il était impensable que cela se déroule sans cette personne qui était présente lors de mon évaluation à mi-parcours. J'apprécie beaucoup ses questions et remarques, son angle d'approche et point de vue qui ouvrent la réflexion. Tous mes remerciements Elisabeth.

C'est une grande chance d'avoir rencontré Monsieur le professeur *Pierre Cubaud* et d'avoir pu découvrir la personne brillante qu'il est, sa gentillesse, sa finesse d'esprit et son humour. Je remercie énormément Pierre pour tous les partages, échanges, sa bienveillance et bien sûr sa participation à la soutenance.

Les moments partagés avec le professeur *Fouad Badran* ont été riches. Par ses questions, il m'a entraînée, comme les neurones, à chercher profondément toujours plus loin, les réponses aux questionnements. Un très grand merci Fouad. L'orientation vers les réseaux de neurones est tienne. Sans ta réflexion d'expert, je n'aurais sans doute pas exploré cette voie, moi qui ne connaissais rien à ce domaine. J'ai tout appris dans cette histoire.

Je côtoie depuis quelques années maintenant *Samia Bouzefrane*. Samia, je te remercie pour tout et, en particulier d'avoir placé sur mon chemin ce chercheur de qualité avec lequel j'ai pu établir un bon contact. En effet, grâce à *Soumya Banerjee*, le modèle hybride profond proposé a pu voir le jour. Un grand merci Soumya. Ce travail fut riche en enseignements. Que notre collaboration en cours se poursuive !

Une pensée pour *Jérôme Dupire*, le troisième larron du groupe affective computing.:-) Jérôme.!

J'aimerais aussi saluer *Françoise Sailhan* et *Stéphane Rovédakis* pour les nombreuses discussions enrichissantes et réconfortantes que nous avons entretenues. Merci pour votre gentillesse et disponibilités.

Un clin d'œil à l'équipe MIM (Médias Interactifs et Mobilité) du laboratoire qui n'est plus. Vive *ILJ* (Interactivité pour Lire et Jouer) ! Je salue toute l'équipe.

Je tiens aussi à remercier les professeurs *Claude Kaiser*, *Gérard Florin* et *Stéphane Natkin* avec lesquels j'ai travaillé durant « beaucoup » d'années, qui m'ont tirée vers le haut par leur érudition qui m'impressionne, par leurs techniques de travail que j'ai observées et engrangées. Sans le savoir, ils m'ont donné l'envie d'aller plus loin. C'est une opportunité de les avoir fréquentés. Ce sont des personnes pas ordinaires.

Un petit clin d'œil à tous les doctorants, je leur souhaite une aventure éblouissante.

Merci à mon équipe admin préférée, *Annie-France Aucaucou*, *Evelyne Emerit* (*my dear friend*), *Hassan Labiah* (*ancien compagnon de route*) et *Nicole Chaouat*, pour avoir facilité le travail au quotidien avec beaucoup de complicité et de gentillesse.

J'en profite également pour remercier *Henri Puglièse*, ami de longue date, toujours prêt à se mettre en quatre. Une belle pensée pour sa famille, en particulier, *Rose*, *Philomène* et *Micheline*.

Je glisse un signe de profonde affection pour mes grandes amies *Bénédicte* et *Catherine* sans oublier leur famille.

Je ne serais rien sans toi, ma petite *Maman*, *Christiane Hervé Gal*, ni sans mon héros de *Papa* et *mes ancêtres*. Merci pour tout ce que tu m'as donné Maman et que tu me donnes encore. Je t'aime.

J'ai grandi dans une belle fratrie, *Roland*, *Paulette*, *Gisèle*. Tous ont l'esprit d'aventure. Un petit clin d'œil particulier à mon frère Roland, un visionnaire, un avant-gardiste avec de grands pouvoirs ainsi qu'à sa femme *Fernande*.

Ji Lin, tu as souvent gratté les idées couchées ici et là sur le papier ou bien tu les as couvées, protégées. C'était une forme d'accompagnement. Ron ron.

Cher *Micka*, merci pour les indications quant aux jeux vidéo, les actualités et réflexions en la matière.

Merci à *Lykaene*, *Varun* et les autres de m'avoir attendue. Vive les gardiens de Hyjal ! « Khronakai Khristor à tous ! ».

A ma chère et tendre fille *Nolwenn*, une grande source d'inspiration et de force depuis le creux de la matrice, je dis un énorme merci. Ma toute précieuse luciole à l'esprit si fin, que nous puissions encore associer nos connaissances et nos intuitions pour toujours aller plus loin ou ... plus près ! hein ! hein ! Rotten teeth XD. C'est surpuissant¹. Non besoin d'autres mots.



¹ Un condensé ☺

Résumé.

Encore et encore s'adapter aux logiciels, aux jeux, tel est le sort des utilisateurs, des joueurs. Notre démarche est différente et veut placer l'humain au cœur de l'espace, de son contexte. Adapter des jeux vidéo ou pervasifs au joueur en fonction de ses émotions est une gageure. Proposer une nouvelle Interaction Humain Environnement dans les jeux avec rétroaction liée aux états émotionnels soulève de nombreuses questions surtout lorsque les états proviennent d'informations physiologiques mesurées à distance. C'est un vrai défi de l'affectique.

En effet, il faut commencer par se demander s'il est possible de découvrir des états émotionnels à partir de mesures issues de biocapteurs de contact. C'est une des premières questions à laquelle nous répondons à l'aide de techniques d'analyse de données non supervisées, d'apprentissages automatique et profond, fondés sur les cartes de Kohonen et un modèle hybride EMDeep, combinaison d'un mélange gaussien, d'un algorithme d'estimation maximisation et d'une méthode de régression. Toutes les analyses sont réalisées à l'aveugle. Nous n'orientons pas ce que les données peuvent révéler. Ce sont les données qui s'expriment. Dans les deux cas nous aboutissons à une classification de types d'individus, ou encore à une reconnaissance d'états. Cette reconnaissance prépare notre étalonnement, la référence que nous essayons de construire. Les états ne sont pas encore identifiés. Pour se faire, ils nécessitent un approfondissement que nous avons déjà engagé à l'aide d'autres méthodes comme la logique floue.

Autre question abordée, est-il envisageable de remplacer les biocapteurs de contact par des dispositifs distants, non invasifs, en obtenant les mêmes résultats ? La réponse est incomplète car il est nécessaire d'affiner nos algorithmes et de renouveler les expérimentations pour perfectionner notre modèle voire le finaliser. Nous proposons néanmoins des procédés remplissant la fonction de captation distante qu'il faudra tester avec l'étalonnement que nous proposons.

Les techniques mises au point proposent des solutions de classification adaptées aux données de type signaux électriques. La réflexion sur une interaction anthropocentrée apporte un point de vue singulier sur une nouvelle façon de concevoir un réseau de communication humain environnement et humain humain.

Mots-clés : Etats émotionnels, affectique, interaction humain environnement, apprentissage non supervisé, capteurs physiologiques, jeux vidéo et pervasifs, cartes de Kohonen, EMDeep, réseaux sans fil, intelligence ambiante.

Abstract

Again and again adapting to software and games is the fate of users and players. Our approach is different and wants to place the human in the heart of space, in its context. Adapting video games or pervasives to the player according to his emotions is a challenge. Proposing a new Human Environment Interaction in games with feedback related to emotional states raises many questions especially when the states come from physiological information measured remotely. It is a real challenge for the affectics.

Indeed, we have to start by wondering whether it is possible to discover emotional states from contact biosensors measurements. This is one of the first questions we answer using unsupervised data analysis techniques, automatic and deep learning, based on Kohonen maps and a hybrid EMDeep model, a combination of a Gaussian mixture model, a maximization expectation algorithm and a regression method. All the analyzes are done blindly. We do not point out what the data can reveal. These are the data that express themselves. In both cases we come to a classification of individuals' types, or even a recognition of states. This recognition prepares our standardization, the reference we are trying to build. The states are not identified yet. To do so, they require a deepening that we have already engaged using other methods such as fuzzy logic.

Another question raised, is it possible to replace contact biosensors with remote, non-invasive devices, obtaining the same results? The answer is incomplete because it is necessary to refine our algorithms and to renew the experiments to improve our model even to finalize it. Nevertheless, we propose processes that fulfill the function of remote capture that will have to be tested with the calibration that we propose.

The techniques developed propose classification solutions adapted to the data of the electric signal type. The reflection on an anthropocentric interaction brings a singular point of view on a new way of conceiving a network of human communication environment and human human.

Keywords: emotional states, affectics, human environment interaction, unsupervised learning, physiological sensors, video and pervasive games, Kohonen maps, EMDeep, wireless network, ambient intelligence.

Table des matières

REMERCIEMENTS	5
RESUME.	9
ABSTRACT	10
TABLE DES MATIERES	11
LISTE DES TABLEAUX	15
LISTE DES FIGURES	17
LISTE DES ANNEXES	23
ABBREVIATIONS, ACRONYMES, SIGLES	25
INTRODUCTION.....	31
CHAPITRE 1 QUE L'EMOTION SOIT !	49
1. EMOTIONS, DES EXPLICATIONS ET NOTRE POSITION	51
1.1. INTRODUCTION – DIFFERENTES APPROCHES DES EMOTIONS.....	51
1.2. ETAT DE L'ART	52
1.2.1. <i>Introduction – Homéostasie</i>	52
1.2.2. <i>Définitions</i>	54
1.2.3. <i>Théories des émotions</i>	64
1.2.4. <i>Rôle, déclenchement et reconnaissance des émotions – communications verbale et non verbale ou orale et non orale</i>	74
1.2.5. <i>Psychophysiologie des émotions</i>	81
1.3. EMOTIONS, ANATOMIE ET BIOLOGIE.....	82
1.3.1. <i>Perception et processus de perception</i>	82
1.3.2. <i>Le système nerveux et les relations avec les émotions : anatomie, fonctionnement et techniques de mesures</i>	84
1.3.3. <i>Le cœur et les relations avec les émotions : anatomie, fonctionnement et techniques de mesures</i> ...	95
1.3.4. <i>Les poumons et les relations avec les émotions : anatomie, fonctionnement et techniques de mesures</i>	103
1.3.5. <i>La peau et les relations avec les émotions : anatomie, fonctionnement et techniques de mesures pour GSR et T° de surface</i>	109
1.4. CONCLUSION.....	116

1.5.	BIBLIOGRAPHIE	118
1.6.	SITOGRAPHIE.....	122
CHAPITRE 2 INTERACTION		123
2. DE L'INTERACTION, DES DISPOSITIFS ET DES TECHNOLOGIES		125
2.1.	INTRODUCTION.....	125
2.2.	DE L'INTERACTION, DES DISPOSITIFS ET TECHNOLOGIES : AU PLUS PRES DE L'HUMAIN TOUT EN ETANT DISTANT	126
2.2.1.	<i>Définitions, terminologie, théories</i>	<i>126</i>
2.2.2.	<i>Des dispositifs et technologies</i>	<i>136</i>
2.3.	AFFECTIQUE.....	162
2.3.1.	<i>Définition.....</i>	<i>163</i>
2.3.2.	<i>Les voies de l'informatique affective</i>	<i>163</i>
2.4.	CONCLUSION.....	164
2.5.	BIBLIOGRAPHIE	166
2.6.	SITOGRAPHIE.....	169
CHAPITRE 3 MISE EN RESEAUX		171
3. RESEAUX ET MISE EN PLACE DES DISPOSITIFS DE COMMUNICATION		173
3.1.	INTRODUCTION.....	173
3.2.	PLATE-FORME SANS FIL	174
3.2.1.	<i>Les capteurs – nos capteurs</i>	<i>175</i>
3.2.2.	<i>Les réseaux de capteurs sans fil</i>	<i>179</i>
3.3.	ARCHITECTURE SELECTIONNEE	195
3.3.1.	<i>Matériel.....</i>	<i>196</i>
3.3.2.	<i>Logiciel.....</i>	<i>203</i>
3.3.3.	<i>Fonctionnement</i>	<i>205</i>
3.4.	CONCLUSION.....	205
3.5.	BIBLIOGRAPHIE	207
3.6.	SITOGRAPHIE.....	209
CHAPITRE 4 DES DONNEES, NOS MODELES		211
4. METHODES DE COLLECTE, D'ANALYSE DE DONNEES DE TYPE PHYSIOLOGIQUE ET NOS PROPOSITIONS TECHNIQUES.....		213
4.1.	INTRODUCTION.....	213
4.2.	METHODES DE COLLECTE ET DONNEES QUALITATIVES ET QUANTITATIVES.....	214
4.2.1.	<i>Introduction et définitions.....</i>	<i>214</i>

4.2.2.	<i>Collecte des données</i>	216
4.3.	LES TECHNIQUES DE STATISTIQUES	217
4.4.	COLLECTE, CHOIX DES TECHNIQUES ET METHODES.....	219
4.4.1.	<i>Collecte de nos données et choix</i>	219
4.4.2.	<i>Méthodologie et choix</i>	221
4.5.	NOS DONNEES PHYSIOLOGIQUES, ANALYSES, NOS DEMARCHES, NOS MODELES	236
4.5.1.	<i>Notre prétraitement des données</i>	238
4.5.2.	<i>Méthodes factorielles appliquées</i>	241
4.5.3.	<i>Méthodes de classification utilisées</i>	248
4.5.4.	<i>La technique SOM appliquée à nos données</i>	257
4.5.5.	<i>Notre technique hybride EMDeep</i>	266
4.5.6.	<i>Conclusion</i>	274
4.6.	BIBLIOGRAPHIE.....	276
4.7.	SITOGRAFIE.....	278
CHAPITRE 5 EN PARTANCE POUR LE JEU.....		279
5. JEU ET PLATE-FORME.....		281
5.1.	INTRODUCTION.....	281
5.2.	DEFINITIONS ET REFERENCES : JEU, PERVASIF ET UBIQUITAIRE, JEU PERVASIF, JEU UBIQUITAIRE, JEU VIDEO	282
5.3.	UNIVERS TECHNIQUE	289
5.4.	CONCEPTION D'UN JEU ET MODELES	290
5.4.1.	<i>Conception</i>	291
5.4.2.	<i>Modèles</i>	293
5.5.	PLATE-FORME DE JEU PERVASIF PRESENTIE.....	297
5.6.	CONCLUSION.....	298
5.7.	BIBLIOGRAPHIE.....	300
5.8.	SITOGRAFIE.....	302
CONCLUSION.....		303
RESUME		356
ABSTRACT		356

Liste des tableaux

Tableau 1 : Différentes formes d'ondes cérébrales et fréquences.....	92
Tableau 2 : Normes de la fréquence cardiaque	100
Tableau 3 : Normes de la pression artérielle	100
Tableau 4 : Classification des niveaux de pression artérielle.....	100
Tableau 5 : Normes de la fréquence respiratoire.....	107
Tableau 6 : Mesures de la conductance.....	115
Tableau 7 : Quelques technologies d'augmentation humaine.....	137
Tableau 8 : Capteurs passifs.....	177
Tableau 9 : Capteurs actifs	177
Tableau 10 : Type de fonctions d'activation ou de transfert.....	232
Tableau 11 : Extraction d'un des fichiers.....	236
Tableau 12 et Tableau 13 : Exemple pour une même expérience de même durée	237
Tableau 14 et Tableau 15 : Exemple pour une même expérience.....	237
Tableau 16 et Tableau 17: Exemple de valeurs CFM manquantes	239
Tableau 18 et Tableau 19 : Exemple de valeur CFM à 0 (ici le minimum).....	240
Tableau 20 : Tableau de valeurs propres.....	243
Tableau 21 : Tableau des corrélations.....	243
Tableau 22 : Contributions des variables (%) :	246
Tableau 23 : Cosinus carrés des variables :	246
Tableau 24 : Matrice de corrélation	247
Tableau 25 : Extrait du tableau contenant toutes les valeurs des nœuds.....	251
Tableau 26 : Décomposition de la variance pour la classification optimale.....	253
Tableau 27 : Un tableau des barycentres des classes	253
Tableau 28 : Un tableau des distances entre barycentres	254
Tableau 29 : Un tableau des observations centrales.....	254
Tableau 30 : Un tableau entre les observations centrales.....	254
Tableau 31 : Des résultats par classe.....	255
Tableau 32 : Extraction d'un tableau contenant les informations liées à huit individus.....	265
Tableau 33 : Correspondance entre le flow et le gameflow	297

Liste des figures

Figure 1 : Régulation de l'homéostasie.....	53
Figure 2 : Episode émotionnel	62
Figure 3 : Circuit de Papez.....	66
Figure 4 : Circuit de Papez à partir d'une émotions.....	67
Figure 5 : Simulation électrique des expressions faciales par Duchenne de Boulogne	68
Figure 6 : Relation entre émotions	70
Figure 7 : Représentation des émotions selon J.A. Russell.....	71
Figure 8 : Autre représentation des émotions en cercle	71
Figure 9 : Composantes du processus émotionnel	73
Figure 10 : Processus et parcours d'un stimulus	75
Figure 11 : Self-Assessment Manikin (SAM).....	79
Figure 12 : Affective slider (AS).....	79
Figure 13 : Détection des émotions suivant la classification de Ekman	80
Figure 14 : Les trois grandes composantes de la dimension émotionnelle	82
Figure 15 : Les subdivision du système nerveux	85
Figure 16 : Schéma A.....	86
Figure 17 : Schéma B – Effets du système végétatif sur les principaux organes.....	86
Figure 18 : Arc réflexe	87
Figure 19 : Le cerveau triunique de McLean	87
Figure 20 : Le système limbique	89
Figure 21 : Transmission de l'influx nerveux	90
Figure 22 : Le potentiel d'action	90
Figure 23 : Electro-encéphalogramme	92
Figure 24 : Magnétoencéphalographie	93
Figure 25 : Tomographie par émission de positons	93
Figure 26 : Imagerie par résonance magnétique	94
Figure 27 : Casque neurosky Figure 28 : Physioscan.....	95
Figure 29 : Zone de contrôle des battements du cœur.....	96
Figure 30 : Différentes parties du cœur et onde relative à un battement	96
Figure 31 : Schéma du potentiel d'action de la fibre myocardique	97
Figure 32 : Schéma de corrélation entre les mouvements ioniques, le potentiel d'action et l'ECG de surface.....	98

Figure 33 : Valves cardiaques	99
Figure 34 : Fréquences cardiaques au repos ou en activité	101
Figure 35 : Tracé d'une onde classique PQRST	102
Figure 36 : La pression artérielle en courbe	102
Figure 37 : Le système respiratoire	104
Figure 38 : Appareil respiratoire et échanges gazeux	105
Figure 39 : Respiration et volume thoraciques.....	106
Figure 40 : Spiromètre à cloche	107
Figure 41 : Courbe des paramètres ventilatoires.....	108
Figure 42 : Fonctionnement d'un oxymètre	109
Figure 43 : Coupe de la peau.....	110
Figure 44 : Récepteurs de la peau	112
Figure 45 : Représentation de la thermorégulation et des réponses provoquées par une exposition au froid ou à la chaleur.....	113
Figure 46 : Courbe de l'activité électrodermale lors d'un stimulus.....	115
Figure 47 : Activité phasique	116
Figure 48 : Capteurs de conductivité électrodermale.....	116
Figure 49 : Cartographies de l'expérience utilisateur	128
Figure 50 : Différences entre expérience utilisateur et interface utilisateur	129
Figure 51: Carte d'empathie créée par Dave Gray (XPLANE).....	130
Figure 52 : Schéma de base d'un système interactif	133
Figure 53 : Processus général du cycle de traitement de l'information	139
Figure 54 : Traitement de l'information et attention.....	140
Figure 55 : Oculus	141
Figure 56 : Casque VR leap motion	141
Figure 57 : Lunettes de Laster Technologies	142
Figure 58 : Oreillettes bluetooth.....	143
Figure 59 : Oreillettes bluetooth et induction.....	143
Figure 60 : Modèle d'aide auditive	144
Figure 61 : Modèle d'aide auditive miniaturisée	144
Figure 62 : Implant auditif	144
Figure 63 : Peau électronique.....	145
Figure 64 : Gant-téléphone.....	146
Figure 65 : Simulateur tactile.....	146

Figure 66 : Meta Cookie	147
Figure 67 : Sucette numérique	148
Figure 68 : Cartouches olfactives.....	149
Figure 69 : Odoravision.....	149
Figure 70 : Nouvelles odeurs pour odoravision	150
Figure 71 : Neurosky.....	151
Figure 72 : Description des différentes parties du Neurosky	152
Figure 73 : Mindflex	152
Figure 74 : Necomimi et communication.....	153
Figure 75 : Audeo.....	154
Figure 76 : Implants cérébraux sur personne paralysée	157
Figure 77 : Implant transcrânien et œil robotique	157
Figure 78 : Implant sous peau pour mesures physiologiques.....	158
Figure 79 : Cardiofréquencemètre.....	158
Figure 80 : Oxymètre	159
Figure 81 : Casque de réalité virtuelle associée à des manettes	159
Figure 82 : Bâton de mage du monde réel	160
Figure 83 : Synthèse de mesures potentielles sur l'humain	161
Figure 84 : Spectre des ondes électromagnétiques.....	175
Figure 85 : Fonctionnement d'un capteur sur toute la chaîne	176
Figure 86 : Structure générale d'un nœud capteur	182
Figure 87 : Exemple de réseaux de capteurs sans fil.....	182
Figure 88 : Architectures à plat et hiérarchique	183
Figure 89 : Le modèle OSI – son fonctionnement	184
Figure 90 : Technologies embarquées et protocoles	189
Figure 91 : Consommation et distance	190
Figure 92 : Réseaux sans fil	191
Figure 93 : Pile de protocoles Zigbee.....	193
Figure 94 : Trame de données Zigbee	194
Figure 95 : Schéma de notre environnement futur	195
Figure 96 : Radar à ondes et rythme cardiaque	197
Figure 97 : Mesures de la fréquence cardiaque et de la fréquence respiratoire à l'aide d'une caméra	198
Figure 98 : Exemples de modules Xbee – série 1, série 2 et pro avec antenne.....	199

Figure 99 : Description de la carte Arduino et caractéristiques de la carte.....	201
Figure 100 : Schéma d'un nœud basique Arduino	202
Figure 101 : Interface du logiciel X-CTU	204
Figure 102 : Interface IDE Arduino	205
Figure 103 : Les plans d'expériences optimisent les trois parties encadrées du processus d'acquisition des connaissances	217
Figure 104 : Schéma d'apprentissage supervisé	224
Figure 105 : Méthodes de classification non supervisée (Hajjar, 2014)	225
Figure 106 : Schéma de comparaison entre les deux modes.....	228
Figure 107 : Structure d'un réseau de neurone formel.....	230
Figure 108 : Quantification vectorielle des données d'entrée vers une grille de référents	234
Figure 109 : Exemple de cercle de corrélations	245
Figure 110 : Biplot (axes F1 et F2 : 85,59 %).....	247
Figure 111 : Exemple de cercle de corrélations	248
Figure 112 : Représentation du dendrogramme	252
Figure 113 : Dendrogramme simplifié	252
Figure 114 : Profil des classes.....	255
Figure 115 : Interprétation de l'algorithme de Teuvo Kohonen	257
Figure 116 : Courbe d'apprentissage	261
Figure 117 : Carte 20 x 20 des nœuds.....	261
Figure 118 : Représentation de la projection d'un individu sur la carte avec zoom	264
Figure 119 : Fonctionnement d'une machine à vecteurs support (SVM)	272
Figure 120 : Technique d'apprentissage automatique pour la classification d'états émotionnels à partir de mesures physiologiques.....	273
Figure 121 : Exemple 1 d'accessoires utilisés dans le projet Momentum	286
Figure 122 : Exemple 2 d'accessoires utilisés dans le projet Momentum et lieu d'événement..	287
Figure 123 : Exemple d'écran du jeu Ingress.....	287
Figure 124 : Exemple d'écran du jeu Pokemon Go	288
Figure 125 : Exemple comparatif d'écrans de jeux Pokémon Go et Ingress	289
Figure 126 : Expérience de jeu = la forme + le fond	290
Figure 127 : Expérience de jeu détaillée	291
Figure 128 : Exemple de jeu simplifiée	292
Figure 129 : Différents types de boucles de jeu	292
Figure 130 : Déroulement du processus de création	293

Figure 131 : Adaptation de Moneta de l'état de flow	294
Figure 132 : Placement du flow suivant le contexte	296

Liste des annexes

Annexe 1 Tableau autour des émotions (Chapitre 1).....	311
Annexe 2 : Différents schémas processus émotionnels (Chapitre 1).....	312
Annexe 3 : Différentes théories des émotions (Chapitre 1)	313
Annexe 4 : Le circuit des émotions (Chapitre 1)	314
Annexe 5 : biais cognitifs (chapitre1)	315
Annexe 1 : courbes d'apprentissage (Chapitre 4)	317
Annexe 2 : codes plot (Chapitre 4).....	320
Annexe 3 : counts plot (Chapitre 4)	325
Annexe 4 : Graphiques Xlstat des huit fichiers concaténés (Chapitre 4).....	326
Annexe 5 : carte d'apprentissage des 8 fichiers et projection des 6 individus un à un sur cette carte (Chapitre 4)	328
Annexe 6 : projection d'un nouvel individu (7) sur la carte apprise des 8 fichiers (Chapitre 4)	331
Annexe 7 : étude avec les cinq fichiers et une même expérience (Chapitre 4).....	332
Annexe 8 : visualisation bilan des onze fichiers (Chapitre 4).....	334
Annexe 10 : plan d'expériences et questionnaires (Chapitre 4).....	336
Annexe 11 : neurone biologique (chapitre 4).....	343
Annexe 12 : extrait programme R – carte Kohonen sur 8 expériences (chapitre 4)	345
Annexe 13 : extrait programme Python – Mélange Gaussien, SVR (chapitre 4)	349

Abréviations, acronymes, sigles

A

ACM	
Association for Computing Machinery	122
ACP	
Analyse en Composantes Principales	230
AFIA	
Association Française pour l'Intelligence Artificielle	36
ANR	
Agence Nationale de la Recherche	27
API	
Application Programming Interface	194
ARCo	
l'Association pour la Recherche sur la Cognition	36
ARG	
Alternate Reality Game	Voir JRA

B

BCI	
Brain-Computer Interface. Interface cerveau machine.	36
BLE	
Bluetooth Low Energy	177

C

CAH	
Classification Ascendante Hiérarchique	237
CEA	
Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives	31
CFM	
Cardiofréquencemètre	153
CHI	
Computer Human Interaction	IHM
CHM	
Communication Homme Machine	123
Coopération Homme Machine	123
CNN	

Convolutional Neural Network. Réseaux de neurones à convolution.....	258
CNRTL	
Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales.....	44
CSMA-CA	
Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance.	182

D

DHM	
Dialogue Homme Machine	123

E

ECoG	
Electrocorticogramme. Enregistrement graphique, à l'aide d'électrodes en contact direct du cortex, de l'activité cérébrale.	31
EDA	
Electrodermal activity. Activité électrodermale.....	105
EEG	
Electroencéphalographie ou électroencéphalogramme.....	82
EFRN	
European Flow Researchers Network.	285
EM	
Estimation Maximisation. Expectation Maximization.	255
EPA	
Evaluation, Potency, and Activity. Évaluation, puissance et activité.	63

F

FACS	
Facial Action Coding System. Méthode de description des mouvements du visage.	71
FFD	
Full Function Device.	182

G

GMM	
Gaussian Mixture Model. Mélange de Gaussiennes	216
GSR	
Galvanic Skin Response. Réponse galvanique de la peau. Résistance électrodermale.	107

H

HCI

Human Computer InterfaceIHM

HTTP

Hyper Transfert protocol177

I

IA

Intelligence artificielle.....211

IdO

Internet des Objets.169

IEEE

Institute of Electric and Electronics Engineering.....173

IETF

Internet Engineering Task Force.173

IHM

Interaction Humain Machine. Interaction Homme Machine. Interface Homme Machine.122

IIHM

Interface Intelligente Homme machine.124

Interface Intelligente Homme Machine.127

IND

Interface Neuronale Directe.125

IoT

Internet of Things..... Voir IdO

IRM

Imagerie par Résonance Magnétique85

IRMf

IRM fonctionnelle..... Voir IRM

ISO

International Organization for Standardization. Organisation internationale de normalisation117

J

JRA

Jeu en Réalité Alterné.274

L

LAN

Local Area Network.....175

LED	
Light-Emitting Diode. Diode électroluminescente.	99
LR WPAN	
Low Rate Wireless Personal Area Network.	182

M

MAC	
Medium Access Control.	182
MAN	
Metropolitan Area Network.	175
MEG	
Magnétoencéphalographie.	84

N

nanoIP	
nano Internet Protocol.	178
NFC	
Near Fiel Communication. Communication en champ proche.	176
NUI	
Natural User Interface. Interface utilisateur naturelle.	26

O

OMS	
Organisation Mondiale de la Santé.	196
OSI	
Open Systems Interconnection.	173

P

PLUG	
Play Ubiquitous Games and play more. Projet ANR. Le projet PLUG vise à favoriser l'émergence de jeux pervasifs. ... Voir ANR	
PPDU	
Physical Protocol Data Unit.	184
PX	
Player eXperience. Expérience du joueur.	120

Q

QoS

Quality of Service.	184
--------------------------	-----

R

R&D

Recherche et développement.	36
----------------------------------	----

RCSF

Réseaux de Capteurs Sans Fil.	163
------------------------------------	-----

RFD

Reduced Function Device.	182
-------------------------------	-----

RFID

Radio Frequency IDentification.	176
--------------------------------------	-----

S

SAM

Self-assessment manikin. Echelle non-verbale de mesure des dimensions émotionnelles.	70
---	----

SIGCHI

Special Interest Group on Computer-Human Interaction.	122
--	-----

SIGGRAPH

Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques de l'ACM. Séminaire américain sur l'infographie.	31
--	----

SNA

Système Nerveux Autonome.	75
--------------------------------	----

SNC

Système Nerveux Central.	75
-------------------------------	----

SNP

Système Nerveux périphérique.	75
------------------------------------	----

SNV

Système Nerveux Végétatif.	76
---------------------------------	----

SOM

Self Organizing Map.	216
---------------------------	-----

SVC

Classification à Vecteurs de Support.	214
--	-----

SVM

Support Vector Machine.	210
------------------------------	-----

SVR

Support Vector Regression.	239
---------------------------------	-----

T

TCC	
Thérapie Cognitivo-Comportementale	69
TEP	
Tomographie par Emission de Positons	84
TOR	
Tout Ou Rien.	168

U

UART	
Universal Asynchronous Receiver Transmitter.	178
UDP	
User datagram Protocol.	177
UI	
User Interface. Interface utilisateur.	118
UX	
User eXperience. Expérience utilisateur	117

W

Wifi	
Wireless Fidelity.	170
WLAN	
Wireless Local Area Network.	170
WPAN	
Wireless Personal Area Network.	164
WSN	
Wireless Sensor Network.	RCSF
WWW	
World Wide Web.	177

Introduction

"C'est vivre, ça, se battre pour ses idées." Yves Thériault

Vivre des moments exceptionnels, connaître des sensations fortes, du bien-être, nous épanouir font souvent partie de nos rêves ou aspirations. Nous choisissons des moyens très divers pour y arriver : par exemple, pour certains, ce sera l'ascension de l'Everest ou la traversée à la rame des océans, pour d'autres la lecture d'un bon livre ou l'écoute d'un morceau de musique ou bien encore la contemplation d'un paysage, la méditation, la dégustation d'un mets, le partage, la réussite professionnelle, la création. Chacun adopte, opte pour une voie qui lui convient, qui lui est propre, en fonction de ses aspirations. Paul-Henry Chombart de Lauwe (1964) exprime ce fait. « *Les aspirations liées aux désirs les plus personnels ne sont pas sans rapports avec la situation et le rôle social de celui qui les ressent. De même les grandes aspirations collectives qui semblent parfois entraîner des groupes étendus, voire des sociétés entières, sont vécues d'une façon originale par chacun des acteurs en fonction de son caractère, de sa personnalité, de son histoire, de sa vocation. Les aspirations sont à la charnière du personnel et, du social. Il est impossible de les étudier sans situer les hommes qui les expriment dans l'ensemble des structures sociales, dans leur culture particulière et dans le mouvement historique dans lesquels ils sont impliqués* ».²

Chaque expérience est ainsi individuelle, plus ou moins impactée par le contexte dans lequel elle se déroule, le vécu et le ressenti. L'environnement tout comme la culture apparaissant au cœur de la compréhension, du comportement de l'homme auront une influence sur les différentes interactions qu'il aura avec le monde et vice-versa. Cette dimension nous accompagnera dans nos recherches.

Pour les besoins de l'étude et par choix, nous avons retenu le domaine des jeux. Jouer pour se divertir, prendre du plaisir, s'évader, apprendre, sont aussi des alternatives pour atteindre nos aspirations, quelles que soient nos quêtes. Dans le jeu et à travers notre perception sensorielle, nous recherchons des émotions. Nous désirons vivre des moments singuliers qu'ils soient liés à la compétitivité, la coopération, la fantaisie, la curiosité, le divertissement, le défi, ou à n'importe quelle autre sollicitation. Comme dit le psychiatre Serge Tisseron « *Le jeu a toujours existé, il est aussi ancien que l'être humain* » ou encore « *Ça nous aide à faire face à l'imprévu en nous donnant la capacité d'inventer de nouvelles réponses. En somme, le jeu permet à l'espèce humaine de rester en vie* ».³

Afin de satisfaire les joueurs, les créateurs de jeux n'ont cessé de proposer de nouveaux produits, des univers variés, de nouvelles interfaces ... et de l'interactivité. C'est au travers de différentes

² http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/rfsoc_0035-2969_1964_num_5_2_6327 (consulté le 15 mai 2015)

³ <http://www.cles.com/enquetes/article/pourquoi-nous-sommes-accros-aux-jeux> (consulté le 15 mai 2015)

observations, lectures, travaux menés que nous avons le sentiment que toutes les interfaces, même actuelles, utilisées dans le cadre des jeux vidéo ou jeux pervasifs sont un frein, une entrave à l'immersion, au naturel donc à la composante émotionnelle. Cette composante est importante dans une interaction et/ou interface et en fait son succès comme l'énonce très bien Jean Caelen (1996). Nous ne remettons pas en cause le fait que les nouveaux dispositifs humain-machine, telles que les interfaces utilisateurs naturelles (NUI) ou encore les télécommandes sans fil, comme par exemples la wiimote, les manettes contrôleurs, peuvent dans certains jeux correspondre à la prolongation de la pensée via le toucher, la voix, le geste. Ce sont de belles avancées technologiques. Mais, dans de nombreux jeux, les joueurs en voudraient plus en supprimant toute entrave matérielle. Que le joueur recherche l'originalité, les défis, la découverte, une histoire, la communication, ou d'autres buts, ce sont des états émotionnels, propres à chacun, qui sont l'objet de sa quête. Le joueur attend que le jeu lui procure du plaisir, des sensations en tout genre.

La question que nous nous posons est comment lui apporter ce qu'il désire sans l'interface si souvent incommode. Asimov indiquait qu'une bonne interface doit être transparente et s'intégrer totalement dans le monde humain avec une touche de résistance (Feitelson, 2007). Quant à lui, Mark Weiser (1991, 1996) avait une approche telle que : *« Les technologies les plus profondément enracinées sont les technologies invisibles. Elles s'intègrent dans la trame de la vie quotidienne jusqu'à ne plus pouvoir en être distinguées »* instaurant ainsi le principe de l'informatique ubiquitaire ou la technologie calme⁴, qui désigne le caractère non intrusif, invisible, s'intégrant aux objets courants et que nous retrouverons au chapitre 2.

Ressentir, percevoir les formes, les odeurs, les matières, des états et bien d'autres choses encore sans dispositif physique autre que notre corps, échanger directement avec la machine ou plus exactement l'environnement et un "game" design adapté, constituent le but de notre travail. Nous tenons à préciser que nous ne nous plaçons pas dans la démarche de donner des émotions et/ou des expressions à des agents virtuels comme (Pélachaud, 2009) dans le jeu, même si les émotions ressenties par le joueur peuvent passer par cette phase. Nous cherchons à obtenir des informations sur l'état émotionnel des joueurs afin de pouvoir mettre en place des interfaces et donc des interactions leur offrant des sensations nouvelles. Il ne s'agit pas uniquement d'éprouver des émotions mais également de réagir en conséquence, en fonction du contexte, de l'histoire mais aussi de leur perception, de leur analyse, de leur ressenti, de leur vécu, donc d'interagir. L'objectif du travail est d'offrir aux joueurs de jeux vidéo et pervasifs ou de proposer à d'autres domaines d'application une nouvelle liaison interactive liée aux sens, à des états émotionnels pour une immersion singulière et intelligente.

⁴ <http://www.ubiq.com/weiser/calmtech/calmtech.htm> (consulté le 2 juin 2015)

Pour proposer un nouveau procédé, il nous est indispensable, étape par étape, de définir notre environnement, de mettre en place des protocoles expérimentaux, de nous appuyer sur des expériences déjà accomplies, de mener de nouvelles expérimentations, d'en tirer les conclusions qui s'imposent et peut-être poser de nouvelles approches d'interactions entre le corps humain et notre environnement.

Notre démarche s'est aiguisée au fil du temps, des articles, des expériences, des projets menés et de nos intuitions. Plusieurs points de départ ont contribué au démarrage de notre étude comme certaines lectures ou films de sciences-fictions et une précédente expérimentation, non complètement aboutie, effectuée dans le cadre du projet de recherche exploratoire ANR (Agence nationale de la Recherche) PLUG⁵ (PLay Ubiquitous Games and play more), ayant pour objet l'étude de technologies embarquées et mobiles pour les jeux ambiants, pervasifs ou encore ubiquitaires. Nous les présentons ci-après.

Contexte et préquelles

Comme beaucoup de chercheurs, créateurs, entrepreneurs, écrivains de science-fiction, nous souhaitons accéder à un moyen humain direct, naturel et convivial assurant une communication, une interaction intuitive, adaptée, non invasive et, extraordinaire avec tout ce qui nous entoure. Dans un premier temps, nous revenons sur différentes fictions ou approches qui nous ont fait rêver, parfois visionnaires, et examinons les avancées. Puis nous rappelons le projet PLUG. Ces ingrédients ont contribué au démarrage de la thèse.

Science-fiction et réalité

Présentons quelques exemples de fictions inspirants ou inspirés et expériences sensorielles qui nous interpellent et nous font accéder à des mondes fantastiques et à des questionnements sur le rêve ou la réalité de la « symbiose » homme-machine-univers, le futur des sociétés humaines et des éventuels dangers.

« L'être humain d'aujourd'hui – et plus encore celui de 2020 – se reliera, par ces outils, à un « macroorganisme planétaire », que j'ai appelé, dans L'homme symbiotique, « cybionte » : cyb de cybernétique et bio de biologie. L'homme du futur sera peut-être le résultat d'une complémentarité, et même d'une symbiose, entre être vivant biologique et ce macroorganisme

⁵ <https://cedric.cnam.fr/index.php/labo/projet/view?id=13> (consulté le 28 mars 2015) et <http://plug.cnam.fr/xwiki/bin/view/PLUG/WebHome> (consulté le 13 mai 2015)

hybride (électronique, mécanique, biologique) qui se développe à une vitesse accélérée sur la Terre et qui va déterminer, en partie, notre avenir... » (De Rosnay, 2008, 2020). Cette vision nous ouvre des fenêtres sur un univers d'hommes réparés, augmentés, connectés, transformés, reliés et nous conforte dans notre idée de rechercher un nouveau moyen de communication interactive.

Avalon est un film nippon-polonais réalisé par Mamoru Oshii, sorti en 2001. Avalon traite de la relation entre mondes physique et métaphysique, réel et virtuel. Il s'agit pour les joueurs de brancher directement leur cerveau à un jeu de guerre via une interface volumineuse et envahissante. Ce dispositif est composé d'un fauteuil en position allongée sur lequel s'installe le joueur. Il se coiffe d'un casque qui sert d'interface avec le monde du jeu. Ce système projette le joueur dans un univers où il peut retrouver d'autres joueurs et éventuellement ne pas en revenir. Cela engendre une addiction et une perturbation de leur capacité à différencier le réel du virtuel. Les joueurs recherchent, vivent et ressentent plus de sentiments dans cet univers virtuel que dans la vie réelle. Pour atteindre l'effet recherché, un dispositif lourd et encombrant est mis en place, ce que nous voulons éviter.

Fréquence interdite (*Frequency*) est un film américain réalisé par Gregory Hoblit en 2000. Suite à un accident atmosphérique, un homme va pouvoir dialoguer avec son père décédé depuis des années par le biais d'une vieille radio amateur HAM donc d'ondes. Les deux hommes, chacun dans leur dimension, vont se battre contre une vague de meurtres. Le fils voit son présent changer puisqu'il modifie le passé. Ici la communication s'assoit sur la propagation des ondes radio, un moyen potentiellement à étudier car non invasif et informatif.

Le jeu télévisé **zone rouge**, adapté d'un format néozélandais intitulé "*The Chair*", consiste à poser des questions à un candidat installé sur un fauteuil incliné entouré d'un dispositif pouvant lancer des flammes. Le rythme cardiaque du joueur est associé à une jauge. Plus le rythme augmente, plus le niveau de la jauge approche de la zone rouge. Une fois dans la zone rouge, le candidat n'a plus le droit de répondre et peut perdre ses gains. Il doit donc gérer au mieux son rythme cardiaque. Le cœur du jeu est fondé sur la prise en compte de données physiologiques comme la fréquence cardiaque avec un feedback matérialisé dans l'environnement proche du candidat.

L'ouvrage **Do Androids Dream of Electric Sheep ?**, roman de science-fiction écrit par Philip K. Dick en 1966, adapté au cinéma sous le titre "*Blade runner*", présente la Terre dévastée par une guerre nucléaire, habitée par quelques humains ayant choisi de ne pas partir pour Mars. A l'aide d'un dispositif, le Voigt-Kampff, fondé sur l'empathie, Rick Deckard, resté sur Terre, entreprend de démasquer les androïdes fugitifs. Ce dispositif est fictif mais fortement inspiré des détecteurs de mensonges ou polygraphes. Il permet de mesurer, à l'aide d'un scanner corporel, les réactions

biologiques à des stimuli, qui sont des questions choisies, afin de déterminer si le sujet est un humain ou un répliquant. Tout est fondé sur les résultats émotionnels.

Dans ce même ouvrage, les humains ont accès à une petite boîte noire munie de deux poignées leur permettant d'entrer en empathie avec d'autres humains et ainsi, de partager joies, peines ... Ce partage ou l'utilisation de la boîte à empathie est comme un mode de vie, une religion appelée mercerisme qui apparaît pour la première fois dans le livre *The little black box* de Philip K. Dick en 1964. Cette boîte permet l'empathie parfaite avec Mercer, un martyr en grande souffrance gravissant une colline désolée, avec lequel la personne se connecte et partage son ressenti. Tout est partagé par le biais d'une interface communicante.

L'ouvrage *Minority report*, nouvelle de science-fiction écrite par Philip K. Dick en 1956, adapté au cinéma sous le même titre par S. Spielberg, présente un monde futur alliant une très haute technologie telle l'interface multi-touch et la précognition qui fait partie de la perception extra-sensorielle. Les personnages fictifs sont d'ailleurs nommés les "pré-cogs". Même si une partie de la technologie reste du domaine de la science-fiction, les progrès nous amènent petit à petit vers de nouveaux procédés.

On se souvient de Nyota Uhura, lieutenant à bord du vaisseau « Enterprise » dans la *série Star Trek*. Elle portait en permanence un dispositif à l'oreille. Le parallèle est facile avec une oreillette bluetooth très actuelle.



Dans certains jeux de rôle, les joueurs peuvent évoluer dans un univers futuriste où les compétences sont en grande partie obtenues à partir d'une technologie avancée. Par exemple, dans *Shadowrun*, dont la première version a été éditée en 1989 par FASA Corporation, les personnages utilisent des implants cybernétiques ou biotechnologiques pour augmenter leurs capacités physiques et/ou sensorielles. Internet a été remplacé par le monde virtuel de la matrice qui offre une plus grande immersion.

⁶ <http://left-field-studio.blogspot.fr/2012/03/star-trek-technology-is-here.html> (consulté le 12 mai 2015)



On pourrait également signaler la **triologie Matrix** considérée comme un cyberfilm, sortie entre 1989 et 2003, où l'humain est sous le joug des machines et plus particulièrement de la Matrice. L'humain sert de source d'énergie. Les personnages évoluent entre deux mondes : un monde virtuel celui des machines, prison de l'humain et un monde réel celui d'une Terre dévastée. Le but est alors pour l'homme de reprendre le contrôle de la Matrice.

Il est question ici de la prise de contrôle de l'homme par la machine. Ce n'est pas dans nos perspectives mais cela nous incite à réfléchir aux frontières. L'homme est « maître » de lui-même et riche en ressources. Ce qui nous amène à citer le travail réalisé par Bertrand Piccard, psychiatre et aéronaute, qui, pour mener à bien ses expéditions de tour du monde en ballon ou en avion solaire nécessitant de longues heures de vol, doit trouver le moyen de pallier le problème de manque de sommeil. Il se tourne vers l'autohypnose⁸. Il se plonge dans un état de transe⁹ dissociant son esprit de son corps et peut ainsi garder sa concentration sur son tableau de bord et commandes tout en se reposant. Il utilise pour cela ses ressources intérieures. Dans sa thèse de doctorat (Piccard, 1996), B. Piccard indique que « *les épreuves de l'existence qui constituent souvent des crises majeures, peuvent être vécues comme des possibilités d'évoluer, et peut-être également de développer des ressources intérieures* ». Cela s'apparente à la notion de coping¹⁰ en psychologie qui, de façon résumée, comporte l'émotion vécue et le mécanisme mis en place pour s'y adapter. Il utilise sa

⁷ <http://www.shadowruntabletop.com/site-art/matrix/> (consulté le 12 mai 2015)

⁸ « L'hypnose est ainsi moins une technique qu'un retour à soi-même pour mobiliser ses forces de vie et traverser des processus de changement dans un état de sécurité intérieure. Elle devient une manière d'évoluer, qu'on la pratique ensuite en faisant de la méditation ou de l'autohypnose, le terme importe peu. Nous avons tous nos manières de retrouver un état dans lequel nous pouvons nous sentir en sécurité, parfois simplement en revenant à la beauté de la nature ou d'une impression ancienne, au souvenir d'une musique, d'une image ou d'un contact avec un être cher. Se connecter à soi-même est un moyen de sortir de la dépendance au monde extérieur et à ses propres schémas de pensée périmés, pour créer un espace dans lequel nous évoluons comme nous avons envie de le faire. Il n'y a finalement pas tellement de craintes à avoir par rapport à nous-mêmes. Nous pouvons mobiliser encore plus de confiance que de craintes, et c'est en nous reliant à cette confiance que nous poursuivrons notre évolution psychologique et spirituelle ». CONGRES DU GRAAP, 19 ET 20 MARS 1996 TOUT COMME VOUS 51, SPECIAL n° 10

⁹ « La transe est un état parfaitement naturel et normal, qui consiste à retourner au fond de soi ou de son inconscient pour se mettre en contact avec ses propres ressources, on se reconnecte avec soi-même avant de repartir pour de nouvelles expériences, un peu comme lorsqu'on met une disquette dans l'ordinateur pour nettoyer les virus ». CONGRES DU GRAAP, 19 ET 20 MARS 1996 TOUT COMME VOUS 51, SPECIAL n° 10

¹⁰ « Ensemble des efforts cognitifs et comportementaux destinés à maîtriser, réduire ou tolérer des demandes spécifiques internes et/ou externes, vécues par le sujet comme menaçant, épuisant ou dépassant ses ressources ». Lazarus et Saunier 1978

démarche thérapeutique pour soigner ses patients qui peuvent eux aussi développer leurs ressources intérieures et ainsi devenir plus acteurs de leur évolution.

Nous disposons donc en nous de capacités pas toujours connues nous permettant de faire face ou de répondre à certaines situations. Cette dimension est à explorer pour notre étude.

Autre projet intéressant est celui mené par différentes équipes du CEA au centre de recherche Clinatec à Grenoble, qui tente de faire marcher un tétraplégique grâce à un dispositif piloté par le cerveau à l'aide d'un système sans fil d'acquisition de données et d'électrocorticogrammes¹¹ (ECoG) nommé WIMAGINE, est une belle illustration de cette avancée scientifique. Les équipes travaillent sur les matériels à implanter dans le scalp, le système associé, les différents algorithmes, la calibration et la reconstruction de mouvements et bien sûr sur l'exosquelette EMY (Enhancy MobilitY) présenté au SIGGRAPH en 2013. En mai 2014, ils étaient dans la phase de passage du laboratoire à l'hôpital. Des résultats précliniques sont parus dans (Eliseyev, 2014). Ils ont depuis obtenu les autorisations d'essais cliniques.



Le robot EMY - Lève-toi et marche ?¹²

La plupart des expériences décrites sont tournées vers l'homme augmenté et l'environnement enrichi par la technologie voire la haute technologie qui ne relèvent presque plus de la science-fiction, ou encore, introduisent les capacités inexploitées de notre corps. Aujourd'hui des prothèses, véritables extensions de la personne telles que les membres ou organes artificiels, sont proposées aux patients (prothèses de hanche, d'articulation, de pied ou encore de coeur). Il existe aussi des systèmes de substitution sensorielle qui ont pour principe de donner une information sensorielle par le biais d'un autre support sensoriel. Le dispositif le plus connu est celui de Paul Bach-y-Rita. Il s'agit de la « tonguevision » qui permet la perception d'images par la langue se substituant ainsi à l'œil déficient. La technologie est de plus en plus au service de l'homme pour

¹¹ Enregistrement graphique de l'activité cérébrale grâce à des électrodes en contact direct du cortex (a-conjugaison.nouvelobs.com/definition/electrocorticogramme.php – consulté le 4 octobre 2015)

¹² http://www.lepoint.fr/high-tech-internet/innorobo-les-robots-d-assistance-en-renfort-24-03-20131644931_47.php (consulté le 04 avril 2015)

le mener au bien-être. De nombreux objets communicants se popularisent : montres, bracelets, ceintures, appareils électroménagers, tous objets intelligents.

Les frontières entre différents domaines se brisent et laissent place à de nouvelles perspectives comme l'évoque Guy Thuiller¹³ en rappelant les propos de De Rosnay (2008) : « *La biotique, résultat de la fusion de la biologie et de l'informatique, s'attache à la mise au point de nouveaux composants et de circuits électroniques moléculaires (biopuces, biotransistors) ainsi qu'au développement d'interfaces bioélectroniques entre l'homme, les ordinateurs et les réseaux. Les frontières entre le biologique, le mécanique et l'électronique s'estompent* ».

Le mouvement transhumaniste, datant de l'antiquité, montre également la quête de l'homme quant à l'amélioration de son état, au refus de certaines caractéristiques de la condition humaine comme la maladie, la souffrance, la mort, ou bien encore au perfectionnement de l'homme et, n'a cessé d'évoluer jusqu'à nos jours. Nous pouvons nous référer à (Bostrom, 2011) pour l'histoire de la pensée transhumaniste.

Un reportage de 2014 diffusé sur Arte¹⁴ aborde ce thème. « *Un courant philosophique prône la transformation et le dépassement physique et mental de la nature humaine grâce à la technologie* ». « *Il s'agirait d'abord de réparer l'homme et de le libérer de ses vulnérabilités biologiques, puis d'augmenter ses capacités, notamment cérébrales, pour en faire un homme beaucoup plus puissant, avant d'enfin ralentir le vieillissement du corps* ». « *Voilà à quoi notre corps pourrait bientôt ressembler si on l'équipait des dernières technologies. Excitant ou angoissant ? A vous de juger !* »



¹³ http://culture.numerique.free.fr/publications/ludo13/Thuillier_Ludovia_2013.pdf (consulté le 15 mai 2015) Les interfaces numériques dans l'imaginaire de science-fiction

¹⁴ <http://www.futuremag.fr/infographie/demain-lhomme-augmente> (consulté le 12 mai 2015)

Toutes ces avancées sont des assistances, des appuis à l'homme et nous amènent à des questionnements. Pourquoi l'homme ne pourrait-il pas grâce à ces progrès, à la technologie, se découvrir ou retrouver des potentiels à exploiter, à mettre en œuvre ? Ne devrions-nous pas regarder les choses dans un autre sens à savoir l'environnement augmenté par l'homme avec ses facultés, sa compréhension, ses idées ? C'est l'homme qui construit, crée, innove et fait évoluer la technique, la technologie. Pour cela, il se fonde souvent sur la nature, humaine, animale ou végétale voire minérale. De par ces activités, il s'explore et se connaît de mieux en mieux jusqu'à peut-être voir et comprendre que tout ce qui l'entoure n'est qu'un support faisant émerger ses capacités, son potentiel, ses ressources intérieures. La création d'une nouvelle liaison d'échanges homme environnement/univers par la pensée uniquement appartient-elle donc encore au domaine de la science-fiction ? Telle est une de nos questions. Nous allons tout mettre en œuvre pour nous orienter vers un chemin tentant d'y répondre. Les premiers pas se dirigeront vers notre problématique initiale.

Un autre contexte nous a apporté un éclairage quant aux premières démarches à entreprendre pour réaliser notre étude. Il s'agit du projet PLUG.

PLUG

Dans le projet PLUG, nous avons manipulé des capteurs biomédicaux. Afin de situer notre travail, il est utile de dire quelques mots sur ce projet quant au contexte, objectifs et résultats obtenus. Nous souhaitions étudier les caractéristiques acquises à partir de capteurs biomédicaux choisis. Nous devons intégrer un dispositif adapté dit de "biofeedback". Ce dispositif comprenant entre autre les capteurs biomédicaux, portés par des joueurs se déplaçant dans un musée, devaient mesurer la température cutanée, la fréquence respiratoire, la résistance électrodermale, la pression artérielle et l'immobilité du corps.

Le projet avait pour cadre les jeux dits ambiants qui procurent un contexte où l'environnement et le joueur interagissent en permanence. L'idée de départ était donc de récupérer, en temps réel, des informations objectives sur l'évolution physiologique (et, au mieux, affective) liée aux processus émotionnels des différents joueurs mais aussi de la compléter par des informations associées à leur déplacement. Nous avons exploité les travaux menés par Rosalind Picard pionnière de l'informatique affective (Picard, 2004 ; 2000). Ensuite, le scénario du jeu était adapté au vu des données collectées sur le joueur. Pour ce faire, un dispositif de « biofeedback » a été mis en place. Les capteurs étaient montés sur une ceinture thoracique. Les joueurs, munis de ces ceintures, se déplaçaient dans les différents étages du musée pour résoudre les quêtes du scénario du jeu. L'information provenant des capteurs transitait par un réseau maillé sans fil et aboutissait dans une

base de données implémentée sur un serveur. Les données étaient disponibles à tout moment du déroulement du jeu, en temps réel. Le dispositif offrait ainsi au superviseur (maître du jeu ou moteur d'adaptation par exemple) des renseignements sur le joueur. Ces renseignements lui permettaient de moduler et d'adapter ses interventions et de ce fait d'optimiser la gestion du scénario et /ou la difficulté de résolution. Il pouvait aussi grâce à ces éléments renvoyer une ou plusieurs requêtes au joueur relatives à son comportement, lui donnant en conséquence la possibilité de contrôler consciemment son corps.

Au final et pour différentes raisons, seuls deux capteurs ont été montés sur une ceinture abdominale. Le processus de captation fonctionnait bien. Le système de transmission était une technologie Zigbee, préférée pour ses caractéristiques intéressantes dans un contexte de réseau embarqué mobile, en intérieur. Les modules Xbee, fondés sur la technologie Zigbee, utilisés pour la communication sans fil, étaient efficaces et couvraient bien la totalité de l'espace envisagé dans le jeu mais restaient consommateurs d'énergie (Astic, 2012 ; Topol, 2015). Il nous aurait fallu un peu plus de temps pour optimiser leur utilisation. Nous avons réduit le nombre de modules et cela donnait de bons résultats mais nous ne voulions pas mettre en danger le projet alors nous sommes restés sur notre configuration de départ. Les données des capteurs, via les modules, étaient dirigées vers une base de données exploitable soit par un moteur d'adaptation soit par un maître de jeu. En effet, il était possible d'utiliser ces bio-informations afin de déclencher un événement qui était renvoyé au joueur, par exemple, proposer un rendez-vous en un lieu et lui demander de réduire son rythme cardiaque. Le joueur pouvait ainsi répondre par une action de contrôle sur son état émotionnel (d'où le biofeedback).

Avant la mise en situation, nous avons lancé une série de mesures afin de tester les capteurs. Nous devons analyser les données recueillies et construire une cartographie associant les variables obtenues et des émotions. Nous n'avons pas pu disposer de ce travail expérimental car nos capteurs n'étaient pas suffisamment fiables, les données insatisfaisantes. C'est d'ailleurs une des raisons pour lesquelles nous n'avons expérimenté que deux des capteurs, en réel, sans lien établi avec des états émotionnels mais usant des battements cardiaques et des mouvements.

Compte-tenu des résultats obtenus et de certaines défaillances des dispositifs de captation, il est donc primordial de reprendre les expérimentations sur la récupération des réactions émotionnelles, d'en faire une analyse précise fondée sur des techniques de représentation de données multidimensionnelles et ainsi mettre en évidence les relations, les dominantes, une ou plusieurs classifications pertinentes des signaux afin de déterminer les bons critères nécessaires à l'association signaux/émotions. Ce travail préliminaire est essentiel à la mise en place d'un référentiel, fondation de notre recherche.

Cette correspondance pourra ainsi servir aux travaux à venir, orientés vers un mode de transmission ondulatoire, en lien avec la future nouvelle interface et les jeux (ou autres applications).

C'est donc un des points importants de notre étude. Il s'avère confirmé par les travaux de thèse (Hamdi, 2012) qui montrent que la reconnaissance des états émotionnels doit être améliorée entre autre par l'utilisation de signaux physiologiques provenant de l'activité électrodermale et de la température cutanée. Ce que nous mettons en œuvre.

L'utilisation de dispositifs technologiques pour communiquer avec notre environnement passe par la connaissance de ces objets. Nous amenons une description de certains objets ayant servi à notre réflexion après quelques précisions sur l'interaction.

Comme nous le verrons dans le texte, pour aborder notre sujet, de nombreux domaines transverses sont requis. et un état de l'art tourné plus particulièrement vers les émotions, leurs mécaniques, leur reconnaissance au travers des différentes notions, théories et modèles sont présentés. Plusieurs spécialités ont enrichi et nourri nos travaux. La psychologie nous renseigne sur les émotions, le ressenti et les effets sur l'humain et l'environnement. Nous présentons les différentes approches et modèles (de Darwin à nos jours en passant par James, Cannon et les cognitivistes). La neuropsychologie apporte un regard sur la gestion et le fonctionnement des émotions. Les neurosciences nous éclairent sur les mécanismes neurobiologiques comme la perception et les émotions. Nous mentionnons entre autres les travaux de A. Damasio (1995, 1999, 2003). La biologie, la psychobiologie, les médecines énergétiques aident à comprendre les mécanismes physiologiques de l'homme, le fonctionnement cellulaire et les parties en liaison avec les émotions. La physique permet d'accéder à la compréhension des phénomènes énergétiques, circulatoires, ondulatoires, électroniques et le traitement des signaux. Nous abordons également les travaux menés dans le domaine interdisciplinaire qu'est l'affective computing (informatique affective) couvrant à la fois l'informatique, la psychologie et les sciences cognitives et qui nous mène à l'interaction entre technologies et émotions (Picard, 1996,2000).

Tous les progrès dans ces différents domaines et les avancées technologiques sont interdépendants. Nous appréhendons également les travaux menés par différents chercheurs sur les mouvements faciaux comme par exemple (Pélachaud, 2009), les sons objets de vibrations se propageant par ondes ... en relation avec les émotions. Même si notre approche est différente, ils nous renseignent sur les leurs, nous servent à comprendre la communication humaine et nous aident dans notre démarche. Il existe une complémentarité certaine. Nous ajoutons que les sons ont un lien particulier avec notre recherche car ils appartiennent aux phénomènes vibratoires, ondulatoires porteurs d'informations et d'émotions que nous souhaitons exploiter.

Cette interdisciplinarité engendre une ou plusieurs visions des choses selon le point de vue où l'on se place mais très complémentaires. Il est nécessaire de communiquer, d'aborder des sujets parfois aux frontières du connu suivant les domaines afin de débattre et d'enrichir les connaissances. Des communautés émergent et mettent en place des journées d'échanges.

Par exemple, l'association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA) et l'Association pour la Recherche sur la Cognition (ARCo) ont initié depuis 2014 un cycle de journées sur l'irrationnel (JMIC – Journée de Modélisation de l'Irrationnel dans la Cognition), élément des processus cognitifs visant à apporter un éclairage sur le sujet. Notre problématique entre bien en résonance avec ces thèmes abordés comme avec ceux traités par le groupe national de R&D sur les interfaces cerveau-machine (BCI). Dans la communauté BCI française, les chercheurs utilisent des appareils et procédés surtout invasifs. Ce qui n'est pas du tout notre cas mais leurs analyses, travaux et nos échanges nous profitent. Un nouveau groupe de professionnels sur le neurofeedback vient de se constituer et organise régulièrement des journées thématiques.

En résumé, notre problématique, est-il possible de concevoir une nouvelle Interaction Homme Environnement sans dispositif incommode ou visible permettant d'allier rétroaction biologique et états émotionnels ? peut se traduire par : proposer une nouvelle interaction entre l'humain et son environnement avec une adaptation du contexte à l'état émotionnel de l'utilisateur nécessite la reconnaissance des émotions. Il s'en suit peut-on mesurer des états émotionnels à partir de certaines mesures physiologiques comme nous l'envisageons ? Si des états peuvent être mesurées à l'aide de capteurs de contact, peut-on le faire à partir des capteurs distants ? Et, bien sûr, comment remplacer des capteurs de contact par des capteurs de mesures physiologiques distants et obtenir les mêmes résultats ? Si les dispositifs distants répondent à ces attentes alors la nouvelle interaction pourra voir le jour.

Pour des raisons pratiques et d'intérêts, notre contexte tourne autour du jeu, pervasif et vidéo. Nous nous en expliquons. Tout comme nous communiquons sur le choix d'explorer la voie des données physiologiques par le biais de capteurs de contact, dans un premier temps. Puis au travers de chaque chapitre, nous essayons de répondre à ces questions.

La reconnaissance des émotions passe par leur compréhension, nous abordons ce point dans le chapitre 1. Les différentes interactions, dispositifs et technologies de communication utiles au projet sont traités dans le chapitre 2. Qui dit communications, interactions, dit mise en réseau. Cet aspect fait l'objet du chapitre 3. Comme nous l'avons indiqué ci-dessus, les capteurs physiologiques vont nous alimenter en données biologiques qu'il faut étudier, le chapitre 4

présente non seulement les bases de la fouille des données mais exposent nos deux voies explorées pour proposer des solutions innovantes d'analyses de données de ce type. Le chapitre 5 expose une ébauche de plate-forme de jeu que nous voulons mettre en œuvre. Puis, nous concluons sur les résultats obtenus, nos premières contributions, et sur nos perspectives de travail.

Bibliographie

- Astic, I., Aunis, C., Dupire, J., Gal, V., Gressier-Soudan, E., Pitrey, C., Roy, M., Sailhan, F., Simatic, M., Topol, A., Zaza, E., 2012 Informatique et intelligence ambiante : des capteurs aux applications, IC2 traité Informatique et Systèmes d'Information Hermès Lavoisier, chapitre 12 « entre jeux pervasifs et applications critiques » pp 295 - 317
- Bostrom N., 2011 A history of transhumanist thought in Journal of Evolution and Technology Volume 14 Issue 1 April 2005 et reprinted in Academic writing across the discipline, eds NY Pearson Longman 2011
- Chombart de Lauwe, P.H. 1954 Aspirations, images guides et transformations sociales. In: Revue française de sociologie. 1964, 5-2. pp. 180-192
- Damasio, A.R. 1995 L'erreur de Descartes – la raison des émotions, Odile Jacob
- Damasio, A.R. 1999 Le sentiment de soi, Odile Jacob
- Damasio, A.R. 2003 Spinoza avait raison, Odile Jacob
- De Rosnay J., 2008 2020 : les scénarios du futur, Editions Des Idées & des Hommes, pp 229 - 230
- Eliseyev A., Mestais C., Charvet G., Sauter F., Abroug N., Arizumi N., Cokgungor S., Costecalde T., Foerster M., Korczowski L., Morinière B., Porcherot J., Pradal J., Ratel D., Tarrin N., Torres-Martinez N., Verney A., Aksenova T., Benabib A.L., 2014 CLINATEC BCI platform based on the ECoG-recording implant WIMAGINE and the innovative signal-processing : preclinical results, Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2014 36th Annual International Conference of the IEEE
- Feitelson D.G. 2007 Asimov's Laws of Robotics Applied to Software, IEEE Software, vol.24, no. 4, pp. 112, 111, July/August 2007, doi:10.1109/MS.2007.100
- Hamdi, H. 2012 Plate-forme multimodale pour la reconnaissance d'émotions via l'analyse de signaux physiologiques : application à la simulation d'entretiens d'embauche – thèse soutenue le 3 décembre 2012 à l'université d'Angers
- Pélachaud C. Bailly G. 2009 Parole et expression des émotions sur le visage d'humanoïdes virtuels Fuchs, G. Moreau and S. Donikian. Traité de la réalité virtuelle : Volume 5 : les humains virtuels, Presses de l'Ecole des Mines de Paris, pp.187-208, 2009,
- Picard R.W. 2004 Affective computing : challenges, rapport interne du MIT Media Lab Cambridge, MA USA 2004
- Picard R.W. 2000 Affective computing - MIT Press 2000
- Piccard B., 1996 La pédagogie de l'épreuve - une enquête sur l'aspect constructif et révélateur de la maladie, de l'accident et du malheur, thèse de docteur en médecine soutenue en 1996, Faculté de médecine de Lausanne, service de psychiatrie

Topol, A., Dupire, J., Gal, V., 2015 PLUG a ZigBee Network to Play an Ubiquitous Game !, Game and Entertainment Technologies (GET 2015) july 2015 pp 251 – 255 Spain

Weiser, M., 1991 The computer for the 21st century. Scientific American, 265(3), 94-104, 1991

Weiser, M., Brown J.S., 1996 The coming age of calm technology, Xerox Parc, 1996

Chapitre 1

Que l'émotion soit !

« N'oublions pas que les petites émotions sont les grands capitaines de nos vies et qu'à celles-ci nous obéissons sans le savoir ». Vincent Van Gogh

1. EMOTIONS, DES EXPLICATIONS ET NOTRE POSITION 51

1.1.	INTRODUCTION – DIFFERENTES APPROCHES DES EMOTIONS.....	51
1.2.	ETAT DE L'ART	52
1.2.1.	Introduction – Homéostasie	52
1.2.2.	Définitions	54
1.2.3.	Théories des émotions.....	64
1.2.4.	Rôle, déclenchement et reconnaissance des émotions – communications verbale et non verbale ou orale et non orale	74
1.2.5.	Psychophysiologie des émotions	81
1.3.	EMOTIONS, ANATOMIE ET BIOLOGIE.....	82
1.3.1.	Perception et processus de perception.....	82
1.3.2.	Le système nerveux et les relations avec les émotions : anatomie, fonctionnement et techniques de mesures	84
1.3.3.	Le cœur et les relations avec les émotions : anatomie, fonctionnement et techniques de mesures...	95
1.3.4.	Les poumons et les relations avec les émotions : anatomie, fonctionnement et techniques de mesures	103
1.3.5.	La peau et les relations avec les émotions : anatomie, fonctionnement et techniques de mesures pour GSR et T° de surface	109
1.4.	CONCLUSION.....	116
1.5.	BIBLIOGRAPHIE	118
1.6.	SITOGRAPHIE.....	122

1. Emotions, des explications et notre position

1.1. Introduction – Différentes approches des émotions

Les émotions sont partout, nous dictent et influencent nos actions à chaque instant. Elles ne sont pas nouvelles. Il en est déjà fait mention chez les grecs par Epicure, philosophe grec, 342 ou 341 av. J.-C., - 270 av. J.-C., « *chez la plupart des hommes le calme est léthargie, l'émotion fureur* ». Au travers d'une lettre à Ménécée, il dit également « *quand nous parlons du plaisir comme d'un but essentiel, nous ne parlons pas des plaisirs du noceur irrécupérable ou de celui qui a la jouissance pour résidence permanente, mais d'en arriver au stade où l'on ne souffre pas du corps et où l'on n'est pas perturbé de l'âme* ». Il s'agit de se trouver dans un équilibre de l'être dans son entier, corps et âme. Pour plus de détails, on pourra se référer à « *la mesure des affections dans l'épicurisme* » de Prost (2012). L'évaluation des « affections » est déjà un sujet de recherche dans l'antiquité. Jean Frère (2009) explique la place importante des émotions dans la vie quotidienne des sages Grecs comme Platon, Aristote, Epicure ou Sénèque, philosophes, et comment ils cherchent à transmettre les moyens de les apprivoiser (apaiser, canaliser ...).

Toutes les périodes de la vie, sont ponctuées par la recherche de bien-être. Beaucoup ont compris cette quête et surfent sur tout ce qui pourrait répondre à celle-ci. Avec l'évolution des technologies et la montée en puissance des neurosciences, l'émotion est devenue le centre de démarches diverses ou de projets d'envergure tant dans le domaine de la justice¹⁵, du marketing¹⁶ que, bien sûr, en neurosciences¹⁷ ou dans l'art de soigner¹⁸. Connaître les émotions d'un individu offre des perspectives de toucher l'Animal dans son être, de l'attirer, de répondre à ses désirs. Les gens du marketing, de la politique, de la publicité, les chasseurs de tête ... l'ont bien saisi, en usent et en abusent. Le n°20 de la revue INFLUENCIA titré « *L'émotion fiction ou réalité* » présente un ensemble de points de vue tant marketing qu'artistique sur la question. Il est aussi abordé et mis sous forme d'équation ce que l'on nomme l'intelligence émotionnelle, le quotient émotionnel

¹⁵ <http://www.avocatparis.org/colloque-les-emotions-et-la-justice-campus-le-4-juillet-2019> - consulté le 13 octobre 2019

¹⁶

https://scholar.google.fr/scholar?as_ylo=2019&q=marketing+et+%C3%A9motions+articles+de+recherche&hl=fr&as_sdt=0,5&as_vis=1 – consulté le 13 octobre 2019

¹⁷

https://scholar.google.fr/scholar?as_ylo=2019&q=%C3%A9motions+et+neurosciences&hl=fr&as_sdt=0,5&as_vis=1 – consulté le 13 octobre 2019

¹⁸ https://ch-laborit.fr/wp-content/uploads/1/2019/03/SM235_ART_DE_SOIGNER1.pdf - consulté le 13 octobre 2019

comme le quotient intellectuel ou encore le quotient technique dont parle un des auteurs, Phillipe Beucler (2015) relativement à notre industrie et qu'il formule comme « *La manière dont nous saurons créer de la valeur à partir de l'équation des temps qui viennent (IQ, EQ + TQ) BQ décidera largement de l'issue. Cela se passera là exactement où intelligence, émotion et technologie se rencontrent, et à la vitesse de la lumière. C'est bien l'émotion qui sera le facteur déterminant* »¹⁹. Cela laisse à penser que l'émotion est considérée comme une recette et non simplement comme un ingrédient.

La connaissance des « émotions » est ainsi de plus en plus convoitée pour prendre dans ses filets et faire consommer, sélectionner ... Heureusement il existe également d'autres champs où cette recherche est purement altruiste comme dans certaines médecines, le travail sur la pleine conscience ou encore dans la méditation. Notre positionnement est de proposer une nouvelle façon d'interagir avec l'utilisateur en nous adaptant à lui, à ses « émotions », tout en respectant ses envies.

Approcher les émotions ou tout autre état s'y référant requiert intuition, compréhension, exploration et analyse. Notre démarche cherche à mettre au jour un moyen de détecter des états émotionnels afin d'adapter le contexte à l'utilisateur dans la mesure où celui-ci le désire. L'adaptation peut se faire par la communication de différents types d'informations selon les impacts souhaités et les réponses apportées. Encore faut-il comprendre ce que sont les émotions ? Les parties suivantes proposent un état de l'art et une présentation anatomique et biologique nécessaires à cette compréhension auxquelles se grefferont le processus de perception et une conclusion.

1.2. Etat de l'art

1.2.1. Introduction – Homéostasie

L'humain est un système élaboré d'une grande précision. Il est constitué d'un ensemble d'atomes, de molécules, d'assemblages de différents composants reliés par des systèmes de communications chimiques, électriques, magnétiques... Ce système essaie en permanence de se maintenir en équilibre malgré les modifications intérieures et les sollicitations extérieures. C'est ce que l'on nomme l'homéostasie. L'humain est aussi doué de raison et d'intelligence émotionnelle (Salovey et Mayer, 1990). Comme dit Antonio Damasio (1995) « *Sans émotions, nos raisonnements sont biaisés et nos choix les plus simples peuvent déboucher sur des décisions aberrantes* ».

¹⁹ IQ = Intelligent Quotient, EQ = Emotional Quotient, TQ = Technical Quotient et BQ = « Bloody Quick »

En biologie et selon la définition du Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (CNRTL), l'homéostasie est la « *tendance de l'organisme à maintenir ou à ramener les différentes constantes physiologiques (température, débit sanguin, tension artérielle, etc.) à des degrés qui ne s'écartent pas de la normale* ».

Tout tend en permanence à l'harmonie et l'équilibre quel que soit le niveau macroscopique ou microscopique. Le corps²⁰ est en recherche perpétuelle de cet état. Tout événement impactant cet équilibre est régulé, dans la mesure du possible, par des réactions biologiques, par exemple, afin de ne pas développer de pathologie. Les processus des émotions comme la perception et l'expression font partie des données de régulation de l'organisme. C'est grâce aux variations constatées pour retrouver l'équilibre que notre étude est possible.

Trois composantes fondamentales participent aux mécanismes de régulation : un récepteur, un centre de régulation et un effecteur. La figure 1 présente la régulation de l'homéostasie.

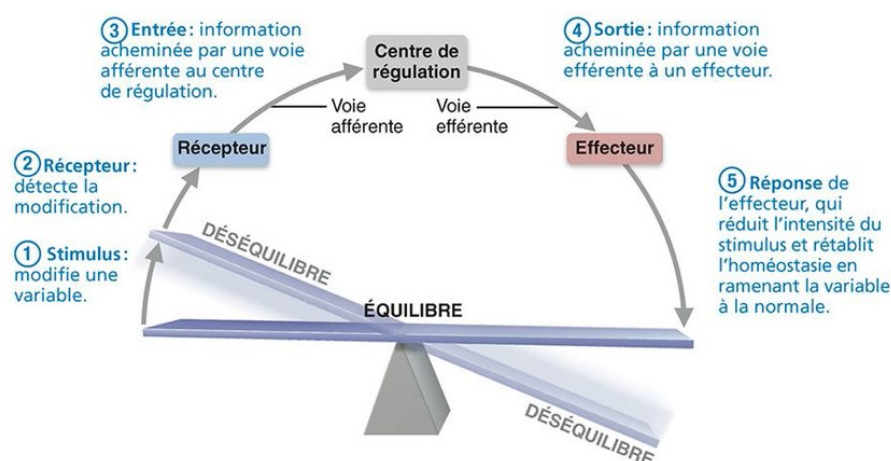


Figure 1 : Régulation de l'homéostasie

<https://slideplayer.fr/slide/468143/> - consulté le 14 septembre 2018

Le récepteur capte les changements d'équilibre et envoie l'information au centre de régulation. Le centre de régulation détermine le point appelé état contrôlé ou régulé qui doit être maintenu. L'effecteur produit une réaction en réponse au centre de régulation. Les changements d'état du corps peuvent être mesurés par l'intermédiaire de différents indicateurs.

²⁰ Nous considérons ici le corps de façon holistique (matière, fluides, pensée).

1.2.2. Définitions

Depuis la nuit des temps, la notion d'émotion fait couler beaucoup d'encre. Différents concepts comme humeur, passions, états émotionnels, sentiments, affects, états d'âme, pensées, sensations et autres sont utilisés pour désigner des phénomènes générés intérieurement avec ou sans expression extérieure, issus d'objets²¹, au même titre que les émotions. Quelques explications s'imposent car chacune de ces expressions peut avoir un sens différent. Nous donnons ci-après plusieurs définitions qui ont retenu notre attention, qui ont été utiles à la compréhension des textes et échanges variés et qui sont ou ne sont pas toujours totalement en adéquation avec notre pensée. Nous indiquerons celles qui nous paraissent les plus appropriées à notre contexte de recherche.

Anna Tcherkassof dans son ouvrage sur les émotions et leurs expressions (2008) donne un englobant qu'elle nomme états affectifs. Les états affectifs comprendraient les sentiments, l'humeur, les affects, les émotions. Une caractéristique simplifiée commune à chacun de ces états affectifs retrouvée dans toute la littérature est leur bitonalité : positif et négatif ou agréable et désagréable ou bénéfique et nocif ou bon et mauvais... La bivalence est bien connue des informaticiens que nous sommes, mais nous savons que le monde de l'affect est bien plus complexe que cela. Nous nous devons donc de donner des définitions des mots ou concepts, que nous avons utilisés sans toujours bien cerner leurs limites, parfois restant flous ou sans réel consensus même auprès des personnes de métier. Pour les profanes, certains de ces mots sont employés dans des sens très différents des initiés du monde de la psychanalyse ou de celui de la psychologie ou encore plus largement celui des sciences humaines et sociales. Comme le dit Jean-Marie Barbier dans « Affects, émotions, sentiments, quelles différences ? » (2018) *« la terminologie en usage pour décrire la vie affective/émotionnelle se révèle relativement confuse, et mêle par exemple dans un même ensemble indistinct affects, émotions et sentiments »*. Il évoque également le fait que les émotions sont parfois vues comme un obstacle *« Dans les échanges de la vie quotidienne, la vie émotionnelle est également souvent considérée comme susceptible d'entraver les dynamiques d'activité des sujets et de compromettre les résultats de leurs actions. Invitation est faite notamment, sinon injonction, à gérer ses émotions »*. On peut constater ici que le mouvement, l'action sont mis en avant dans un sens négatif alors que le contraire est aussi possible.

Nous proposons donc une liste de termes pour lesquels des définitions savantes sont rapportées quand elles sont proches de nos préoccupations et auxquelles est parfois adjoint un commentaire propre ou une précision.

²¹ L'objet est un concept au sens large pouvant désigner quelque chose de physique ou d'abstrait comme une idée, une sensation, un stimulus externe, etc.

Le point de départ de nos perceptions est la sensation. Commençons par donner des éléments d'information concernant la perception avant d'aborder ce qu'est la sensation. La perception est un concept complexe. Une définition claire, simple et assez complète est celle présentée sur Wikipédia²².

*« La **perception** est l'activité par laquelle un sujet fait l'expérience d'objets ou de propriétés présents dans son environnement. Cette activité repose habituellement sur des informations délivrées par ses sens. Chez l'espèce humaine, la perception est aussi liée aux mécanismes de cognition. Le mot « perception » désigne :*

- *soit le processus de recueil et de traitement de l'information sensorielle ou sensible (en psychologie cognitive par exemple),*
- *soit la prise de conscience qui en résulte (en philosophie de la perception notamment).*
- *le 7ème sens ?*

En psychologie expérimentale, chez l'être humain en particulier, on distingue des échelles de perception consciente d'une part, et la perception inconsciente, d'autre part. Celle-ci est qualifiée parfois d'« implicite » ou « subliminale ». Cette distinction a été étendue aux autres animaux dans la mesure où ils peuvent être entraînés et conditionnés à indiquer s'ils ont perçu ou non un stimulus.

La perception d'une situation fait appel tout à la fois aux sens physiologiques d'un organisme et à ses capacités cognitives, à un niveau élémentaire ou conscient ».

Cette définition montre bien qu'il n'y a pas que les sens qui sont impliqués. Il est à constater que la perception passe par des processus physiologiques et cognitifs.

Sensation

La **sensation** est selon le grand dictionnaire de la psychologie Larousse un « événement psychique élémentaire résultant du traitement de l'information dans le système nerveux central à la suite d'une stimulation d'un organe des sens ». Nous pouvons ajouter que l'origine de la sensation peut être endogène. A partir de là, il est possible de comprendre comment certaines personnes recherchent des sensations (sensation seeking) au travers de nouvelles expériences ou d'expériences intenses.

La définition du mot **sensation** donnée par le CNRTL (consulté le 7 mai 2018) est très longue. Nous ne retenons que les concepts les plus proches de notre domaine, comme en psychologie et

²² <https://fr.wikipedia.org/wiki/Perception> - consulté le 13 octobre 2019

physiologie, où ce terme est le « *Phénomène par lequel une stimulation physiologique (externe ou interne) provoque, chez un être vivant et conscient, une réaction spécifique produisant une perception ; état provoqué par ce phénomène* » ou « *État de conscience plus affectif qu'intellectuel ; perception immédiate (d'un état physique ou moral)* » ou encore utilisé au pluriel « *Émotion forte, vive impression faite sur les sens produisant du plaisir* ».

M. Zuckerman (1990), psychiatre, a longuement travaillé sur la notion de recherche de sensation et la considère comme un trait de caractère lié à des différences biologiques entre les humains.

Sensibilité

Chacun réagit selon sa **sensibilité** qui correspond à l'« *ensemble des fonctions de détection et de discrimination des caractéristiques physiques ou chimiques des stimulus* » selon le dictionnaire de la psychologie Larousse.

La **sensibilité** est une propriété de réagir de manière adaptée à une situation. Elle joue un rôle fondamental dans la pensée. Dans Diderot et la physiologie de la sensibilité de François Duchesneau en 1999, on retrouve des vues de Diderot sur la sensibilité comme fonction universelle de la vie et de la pensée. On retrouve également cette notion de lien entre corps et esprit dans un article de Gibello (2004), travail réalisé avec des enfants, qui indique que « *Il est classique depuis un siècle de considérer les représentations mentales faites de représentations de choses, de mots et d'affects* » que l'auteur nomme « *représentations de transformation* ». « *Celles-ci complètent les représentations de chose. Elles ajoutent aux traces sensorielles, esthétiques classiques, les traces des modifications tonicomotrices qui ont accompagné les perceptions sensorielles lors des interactions avec l'objet manipulé et éventuellement transformé par elles* ».

La sensibilité est une variable propre à chacun et pourrait constituer un facteur dans une équation paramétrable en fonction du sujet, de son vécu, de son environnement.

Pensée

La **pensée** est comme l'indique le grand dictionnaire de la psychologie Larousse une « *activité psychique interne, caractérisée par son caractère conscient* ». Qu'en est-il exactement ? Platon le spécifie précisément comme « *un dialogue invisible et silencieux de l'âme avec elle-même* ». Une explication détaillée est dans l'encyclopédie de l'Agora.

Le CNRTL offre plusieurs concepts concernant la **pensée** tels que : « Ensemble des facultés psychologiques tant affectives qu'intellectuelles » ou « Activité affective consciente » ou « Ensemble des fonctions psychiques et psycho-physiologiques ayant la connaissance pour objet ; ensemble des phénomènes par lesquels ces fonctions se manifestent ».

Humeur

Dans le langage courant, on utilise le terme d'**humeur** pour signifier une bonne ou une mauvaise disposition de l'affectivité et du caractère. L'utilisation du mot **humeur** provient d'Hippocrate²³ qui considérait la combinaison des quatre grandes humeurs que sont le sang, la lymphe, la bile jaune et la bile noire pour définir le tempérament.

L'humeur (mood en anglais) est un « niveau affectif et émotionnel de base oscillant entre deux extrêmes : la joie et le plaisir d'une part et la tristesse et la douleur d'autre part » (Bodin, 2013). Le grand dictionnaire de la psychologie donne comme définition « état thymique fondamental dominant la vie affective et les réactions émotionnelles d'un individu ». Le milieu psychiatrique réserve ce mot dans « le sens de l'euphorie, de l'expansivité et de l'excitation, dans les états maniaques, [...], dans les états dépressifs ou mélancoliques ». C'est avec Lorry (1765) puis Pinel (1809) que l'on sort de la connotation humorale en particulier en ce qui concerne la mélancolie.

Sentiment

Jacques Cosnier²⁴ (2015) dans « Psychologie des **émotions** et des **sentiments** », présente ces mots comme « des termes multiples pour des concepts flous ». Il explique à travers son parcours professionnel comment les émotions constituent un point fort dans son travail de recherche en éthologie des communications, en interactions, donne des définitions non seulement des émotions et sentiments, mais aussi évoque les termes comme affects, passions, humeurs ... Il n'est pas sans mentionner la difficulté définitoire, la « polysémie des termes et la pluralité des définitions » parfois antagonistes qui conduit à des choix terminologiques auxquels nous avons été confrontés. Selon le domaine abordé, le CNRTL exprime différentes définitions des **sentiments** :

²³ Médecin Grec, né environ en 460 avant. J.-C. sur l'île de Cos et mort en 377 av. J.-C. et aussi philosophe, considéré comme le père de la médecine.

²⁴ Docteur en médecine, docteur ès sciences, psycholinguiste – professeur émérite en psychologie des communications à l'université Lumière-Lyon, chercheur au CNRS

- dans le domaine des sens « *faculté de sentir percevoir une sensation* »
- dans le domaine de l'affectivité « *état affectif complexe, assez stable et durable, composé d'éléments intellectuels, émotifs ou moraux, et qui concerne soit « le moi » (orgueil, jalousie ...) soit autrui (amour, envie, haine ...)* ».

Wikipédia nous donne le **sentiment** comme étant « *la composante de l'émotion qui implique les fonctions cognitives de l'organisme, la manière d'apprécier. Le sentiment est à l'origine d'une connaissance immédiate ou d'une simple impression. Il renvoie à la perception de l'état physiologique du moment. Le sens psychologique de sentiment qui comprend un état affectif est à distinguer du sens propre de la sensibilité* ».

On trouve également comme définition celle du site Les Définitions : « *les **sentiments** sont des émotions conceptualisées qui déterminent l'état affectif* ». Dans de nombreuses définitions les différents termes que nous explorons sont assemblés, combinés. Nous le verrons plus loin avec la définition de l'état affectif. Ceci ne simplifie pas la compréhension ni le choix des termes.

On pourra consulter la définition de « émotion », un peu plus loin dans le texte, dans laquelle une citation de A. Damasio présente la différence entre sentiment et émotion.

Etats d'âme

Emanuel Swedenborg (1688 – 1772), scientifique, théologien et philosophe suédois, cherche à découvrir les relations entre la matière et l'esprit par ses travaux sur l'anatomie. Baudelaire s'intéressera à sa théorie sur les correspondances entre le monde spirituel et le monde matériel et s'en inspirera pour écrire. Il utilisera l'allégorie pour traduire ses **états d'âme**. On peut dire qu'ils constituent une ambiance psychique, que Christophe André, psychiatre et psychothérapeute français, conçoit « Comme une météo psychique, nos **états d'âme** sont un climat mental ». « Les émotions sont toujours au centre des états d'âme, mais le plus souvent, elles ne poussent pas à l'action, comme le font les vécus émotionnels plus violents ». Les états d'âme « sont en partie déterminés par notre passé et nos expériences affectives antérieures. »

Les **états d'âme** pour Antonio Damasio (2002) sont des « *sentiments d'arrière-plan* ». Ils sont discrets mais bien présents et impactent notre façon de voir et nos comportements.

Affect

L'affect (affect en anglais) est d'après Wikipédia, un état d'esprit correspondant à la manifestation des émotions, des sentiments, de la motivation. Les humeurs (au sens technique : déprime, optimisme, anxiété...) sont des affects ou ont des dimensions affectives. Un affect se présente sous la forme d'une décharge massive temporaire (sous forme de crise) ou d'un état dit "général" parce que longue dans la durée. Il s'agit d'un terme emprunté à l'américain.

La définition de **l'affect** dans le domaine de la psychanalyse et selon Freud, issue de la terminologie psychologique allemande, est « *l'expression qualitative de la quantité d'énergie pulsionnelle et de ses variations* » (Laplanche et Pontalis, 2009)

En psychologie clinique, **l'affect** est « *l'ensemble des manifestations affectives caractérisées par leur nature agréable ou désagréable, qu'elles soient vagues, définies ou, comme les émotions, intenses* » (Psychologies, 2000).

« Les **affects** ne sont pas des états, mais des variations ; plus précisément, des variations conjointes des sujets et de leurs activités » (Barbier, 2018).

Affectivité

L'affectivité désigne selon les carnets2psycho « *l'ensemble des réactions psychiques de l'individu face au monde extérieur. Les psychologues et les physiologues distinguent deux sortes d'affectivité :*

- a) *l'affectivité de base (ou holothymie) : elle recouvre les sentiments vitaux, l'humeur et les émotions.*
- b) *l'affectivité organisée et différenciée (ou catathymie) : elle recouvre des manifestations plus complexes telles que les passions et les sentiments sociaux ».*

Une autre définition donnée par le dictionnaire de l'éducation indique que **l'affectivité** désigne le caractère des phénomènes dits affectifs, l'ensemble des sentiments et des émotions, et la faculté d'éprouver, en réponse à une action quelconque sur notre sensibilité, des sentiments ou des émotions. Les sciences affectives se donnent pour objet d'étude **l'affectivité** et les émotions.

Etat affectif

« Le mot "sentiment" est un synonyme d'émotion, mais avec un sens plus large. Le sentiment désigne un état affectif dont la durée est souvent plus longue que l'émotion et dont la teneur est

aussi plus complexe et plus nuancée » selon La Psychologie. Pour G. Kirouac (1989), les états affectifs recouvrent le concept d'émotion composé également de sentiment et d'humeur associés à une variable temporelle.

Toutes les définitions précédentes nous amènent tout naturellement à celles des émotions. Nous n'avons pas la prétention de définir ce qu'est une émotion. En effet, il existe pléthore de définitions issues des différentes théories et proposées par d'éminents chercheurs dans le domaine, de Hammourabi, Platon, Descartes, Darwin, en passant par Ekman, Scherer, Damasio sans compter tous les autres. Les discussions à ce sujet sont toujours d'actualité.

Emotion

L'**émotion** au sens étymologique vient du latin *emotionem*, de *emotum*, supin de *emovere*, émouvoir comme indiqué dans Le Littré. Selon Wikipédia, il est dérivé d'*émouvoir* formé d'après l'ancien français et moyen français *motion* « mouvement », emprunté au latin *motio* « action de mouvoir, mouvement, trouble, frisson (de fièvre) ».

Voici également plusieurs définitions issues de dictionnaires :

Le dictionnaire de l'Académie française présente **l'émotion**, *n. f. XVe siècle, au sens de « trouble moral » ; XVIe siècle, au sens 2. Dérivé d'émouvoir, d'après l'ancien français motion, de sens analogue.*

I. Class.

1. Trouble, malaise physique. Il a trop marché, cela lui a donné de l'émotion. Une émotion de fièvre, un léger accès de fièvre.

2. Mouvement populaire spontané, trouble subit provoqué par un événement imprévu. On s'efforça de calmer l'émotion populaire.

II. Réaction affective brusque et momentanée, agréable ou pénible, souvent accompagnée de manifestations physiques. Pâlis, rougir sous le coup d'une émotion intense. L'émotion le paralysait. Elle n'avait pu cacher son émotion. Il éprouva une vive émotion en revoyant cette femme. Une émotion communicative. Rechercher les émotions fortes. Évoquer avec émotion des souvenirs de jeunesse. Par ext. Mouvement de la sensibilité provoqué par une impression esthétique, religieuse. Émotion littéraire, musicale. Émotion créatrice. Le public ressentit une émotion profonde en écoutant cet interprète.

La partie II de cette définition est la plus adaptée à notre étude et le deuxième point du I peut aussi convenir mais vise plutôt un groupe. Nos expérimentations sont des expériences individuelles.

Dans le grand dictionnaire de la psychologie Larousse l'**Emotion** correspond à une - « *Constellation de réponses de forte intensité qui comportent des manifestations expressives physiologiques et subjectives typiques. Elles s'accompagnent généralement de tendances d'action caractéristiques et s'inscrivent en rupture de continuité par rapport au processus qui était en cours chez le sujet au moment de leur apparition* ».

Il existe de nombreuses autres définitions du mot **émotion** et nous pouvons constater la complexité de formulation. La difficulté d'exprimer une définition de l'**émotion** est d'ailleurs donnée par Paul R. Kleinginna, JR et Anne M. Kleinginna (1981). Ils ont compilé dans l'article, 92 définitions et 9 déclarations sceptiques issues du domaine des **émotions** et ont proposé une base de définition qui a retenu toute notre attention :

« *Emotion is a complex set of interactions among subjective and objective factors, mediated by neural/hormonal systems, which can (a) give rise to affective experiences such as feelings of arousal, pleasure/displeasure; (b) generate cognitive processes such as emotionally relevant perceptual effects, appraisals, labeling processes; (c) activate widespread physiological adjustments to the arousing conditions; and (d) lead to behavior that is often, but not always, expressive, goal directed, and adaptive* ». (Kleinginna and Kleinginna, 1981)

L'**émotion** est un processus cérébral qui joue un rôle essentiel de fonction cognitive. L'émotion prépare l'organisme à l'action et serait affectée d'une valeur cognitive. L'émotion est le socle qui permet à la raison de fonctionner et le fondement de notre rapport à autrui (Damasio, 1995). On retrouve Damasio dans une interview menée par J.F. Marmion (2018) qui présente la distinction entre émotions et sentiments : « *Les émotions sont des programmes d'action qui se déploient en une sorte de concert : actions de molécules dans le cerveau ou ailleurs dans le corps, actions musculaires ... Les sentiments sont des expériences mentales de toutes ces actions organiques* ».

Episode émotionnel

L'**épisode émotionnel** est selon Jacques Cosnier (2015) une émotion rémanente. Il est de longue durée comme dans le cas d'un deuil par exemple. C'est également ce que mentionne (Scherer, 2005). Cette définition ne correspond pas à nos attentes en particulier dans la durée pourtant, l'approche épisode pourrait convenir si on l'associe à la définition de quelque chose qui surgit en un laps de temps très court et de façon aiguë. Comme mentionné sur le schéma ci-après, la partie

« épisode émotionnel » peut être de longue durée (Cosnier, 2015) et écourtée selon notre vision pour nous conduire à un état émotionnel.

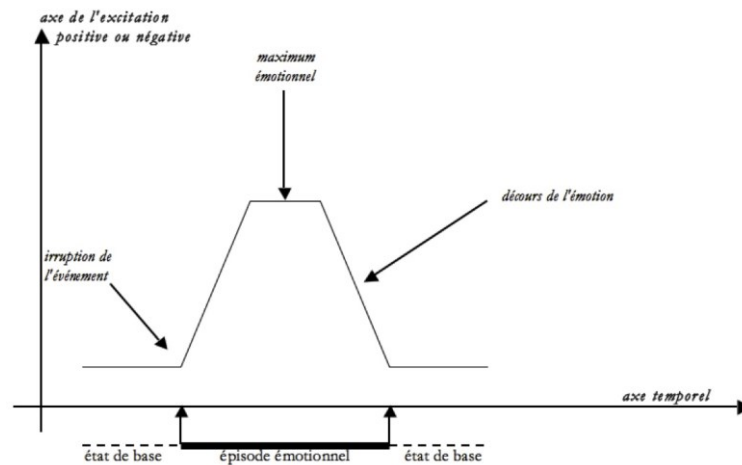


Figure 2 : Episode émotionnel

<http://www.participation-et-democratie.fr/en/dico/emotion> consulté le 14 juillet 2018

Etat émotionnel

Dans les définitions courantes données à ce sujet, l'état émotionnel est considéré comme démarrant dans l'anticipation de l'événement, atteignant un pic au plus fort de l'événement et persistant durant un temps plus ou moins long. Il se traduit par le même schéma que l'épisode émotionnel. Ce qui ne correspond pas totalement à notre approche. Pourtant, l'expression « état émotionnel » exprime le mouvement, le changement comme le passage d'un état à un autre. Dans notre étude, un état émotionnel se traduit par une variation significative des variables et se déroule sur une durée brève pouvant être mesurée en seconde. Il est obtenu par combinaison de plusieurs variables physiologiques et respecte certaines conditions. Si le même motif se répète, on peut peut-être dire que le même état se reproduit. Ce qui est intéressant pour la mise en place d'un modèle.

L'état émotionnel (EE) pourrait ainsi se traduire par l'équation suivante que nous proposons :

$$EE = C(\text{var}\varphi) \pm \Delta$$

où

- C signifie combinaison
- $\text{var}\varphi$ correspond aux variations (amplitude, fréquence) de nos variables physiologiques
- Δ représente ce qui caractérise un individu (son vécu, son environnement, sa sensibilité, etc).

L'intelligence émotionnelle est un concept nouveau mis en avant par Daniel Goleman (1995). Les composantes principales sont la conscience de soi, la maîtrise de soi, la conscience sociale et la gestion des relations. Ce concept est plus ancien et s'apparente à l'intelligence sociale de E. L. Thorndike (1920) qui consiste à reconnaître, comprendre et à maîtriser ses propres émotions et aussi à comprendre celles des autres personnes et les motiver. D. Wechsler (1939) indique qu'il faut prendre en compte les caractéristiques émotionnelles dans les tests d'intelligence. C'est aussi une façon d'appréhender l'intelligence émotionnelle. H. Gardner introduit dans la théorie des intelligences multiples, qu'il a proposée en 1983, l'intelligence interpersonnelle ou intelligence sociale qui s'approche de la notion d'intelligence émotionnelle. C'est W. Payne, dans sa thèse de doctorat « A study of emotion : developping emotional intelligence » qui aurait le premier énoncé le terme d'intelligence émotionnelle. Le terme serait apparu en 1990 par Peter Salovey et J. Mayer dans un article « Emotional Intelligence » dans lequel les auteurs se réfèrent à la thèse non publiée de Payne.

Au vu de ces définitions, nous avons établi un tableau, présenté en annexe 1 (Tableau autour des émotions (chapitre 1)), qui reprend ces expressions et montre les éventuelles articulations entre chacune d'entre elles. Nous pouvons constater que dans la plupart des définitions est évoquée la notion de physiologie sur laquelle nous mettons l'accent dans notre travail.

Nous restons très réservés quant à l'utilisation du mot émotion et préférons état émotionnel comme une variation sensible de mesures. Dans notre étude, nous utilisons la mesure des variables physiologiques en approfondissant son analyse. Il est bien entendu que les états émotionnels sont aussi dépendants d'autres facteurs corrélés.

Nous présentons ci-après une version très allégée des théories des émotions car celles-ci continuent d'évoluer grâce aux travaux menés, aux progrès liés à la connaissance de l'humain et des technologies nouvelles. Elles sont issues des ouvrages de psychologie des émotions de Sander (2014) et de la théorie des émotions de Vygotsky (1998). Il existe aussi des études sur l'histoire des sensibilités, qui permet déjà de reconstituer la vie affective d'antan, initiées en 1982, où il est mentionné que « Lucien Febvre²⁵ réclamait une histoire des usages des sens et la quête des changements opérés, au fil des siècles, dans les systèmes perceptifs et la gamme des émotions. La

²⁵ Lucien Febvre (1878 – 1956) historien moderniste français

réception des messages sensoriels se trouvait englobée, à ses yeux, dans la notion plus générale d'outillage mental », selon Corbin. L'intensité des émotions, dans ce contexte, participe à la manière dont les personnes en tant qu'individu ou groupe d'individus se représentent le monde. Toutes les définitions élaborées, exposées dans le domaine de l'émotion sont issues de différentes théories qui permettent de comprendre, appréhender son évolution, classer et se placer. Nous abordons les grands courants et nous nous positionnons par rapport aux différentes sensibilités énoncées.

1.2.3. Théories des émotions

Les théories des émotions émanent de travaux très anciens :

- Le **code d'Hammourabi**, commenté par P. Cruveilhier (1938), est un texte de lois babylonien de 1750 avant Jésus-Christ, indiquant une des significations du mot cœur en tant qu'« *organe de l'amour de l'intelligence, centre de toutes les passions et de toutes les émotions, principe de toutes les opérations intellectuelles* ». Le commentateur poursuit en indiquant que « *les passions et les émotions bouleversent l'être intérieur et que les imaginations, les idées, les souvenirs, les actes de volonté provenaient de l'intérieur de l'homme* ». Il mentionne aussi que « *le foie était le siège des émotions sensibles* ». « *Toute la psychologie des Hébreux et des Akkadiens tourne autour du cœur* » Dhorme (1922). On constate que l'émotion est liée au corps dont les signes sont originaires de l'âme. Corps et esprit ne feraient-ils qu'un ?
- La **vision de Platon et d'Aristote** est exprimée dans le texte « Une histoire des émotions incarnées » de Boquet et Nagy. Platon (427-428/348 avant Jésus-Christ) liait déjà les émotions, placées du côté de l'âme, aux changements corporels qu'Aristote (383-384/322 avant Jésus-Christ) considérait comme une composante de la passion. Ainsi, les modifications corporelles auraient pu être la cause concrète de l'émotion et les composantes comme l'évaluation, le ressenti et la tendance à l'action la cause formelle : « *il est évident que les émotions (πάθη) sont des formes engagées dans la matière* ». Les auteurs rajoutent également : « *Une disposition physiologique peut influencer sur l'émotion, tout comme, en sens inverse, l'émotion ressentie s'accompagne de changements physiques* ». Il est intéressant de voir apparaître ici un mode d'interactions et de communications à double sens comme nous le concevons.
- Le **stoïcisme** né en 301 avant Jésus-Christ est fondé sur la tempérance et le détachement. Le bonheur s'acquiert par la liberté intérieure sur laquelle il est possible d'agir indépendamment des circonstances extérieures que nous ne pouvons pas

influencer. Cette approche se retrouve chez Descartes et les cognitivo-comportementalistes.

- **Descartes et Spinoza** au 17^{ème} siècle, ont réciproquement abordé les relations corps – esprit différemment. Il est souvent mis en opposition la raison et l'émotion (passion à l'époque). Les émotions, issues du cœur, sont souvent considérées comme des perturbateurs de la raison dont le siège est le cerveau. Ce que l'on retrouve chez Descartes. Alors que Spinoza propose de considérer les émotions et affects (sentiments) comme des régulateurs visant aux processus homéostasiques. Il voit l'émotion comme mouvement avant le sentiment et le corps avant l'esprit.
- **Charles Darwin** (1809 - 1882), au travers de ses recherches sur l'évolution et dans son ouvrage *The Expression of the Emotions in Man and Animals* (1872), offre une nouvelle approche à la notion d'émotions. Il apporte avec précision une explication de chaque expression observée. Sa position est que l'expression des émotions évoluerait au cours des temps et qu'elle s'adapterait au contexte. Les émotions constitueraient ainsi un processus de préparation à l'action, à la communication et à l'adaptation. Les principes d'utilité et d'opposition et l'action directe de l'excitation nerveuse sur le corps sont trois éléments majeurs au développement des émotions. C'est un regard moderne sur la compréhension et la vision des émotions. Des travaux de Charles Darwin ont point les productions contemporaines.

Les théories plus récentes que nous allons aborder dans les paragraphes suivants sont issues des réflexions successives sur l'homme et son évolution à travers les âges et situations.

1.2.3.1. Les grands courants classiques

Les courants classiques s'étendent entre la fin du 19^{ème} siècle et la première moitié du 20^{ème} siècle. C'est la période du débat entre **périphéralistes** et **centralistes**. Si une grande majorité d'entre eux s'entend à reconnaître que les changements corporels, liés au système nerveux périphérique comme les variations du rythme cardiaque ou de la fréquence respiratoire, correspondent à une composante de l'émotion, dans la théorie périphéraliste, c'est la perception de la réaction périphérique qui constitue l'émotion. William James (1842 – 1910), psychologue et philosophe, considéré comme un des pères de la psychologie expérimentale et périphéraliste, dit en 1903 : *« Les changements corporels suivent immédiatement la perception du fait excitant, et le sentiment que nous avons de ces changements à mesure qu'ils se produisent, c'est l'émotion »* et que nous sommes *« affligés parce que nous pleurons, irrités parce que nous frappons, effrayés parce que nous tremblons, et non pas que nous pleurons, frappons ou tremblons parce que nous sommes*

affligés, irrités ou effrayés, suivant le cas ». Cette théorie aussi émise en 1885 par Carl Lange (1834 - 1900), médecin, psychologue et physicien danois, revient à considérer l'émotion comme une réponse aux variations physiologiques. En ce qui concerne les centralistes, comme Walter Cannon²⁶ (1871 – 1945) et Philip Bard (1898 - 1977), physiologistes, la source de l'émotion se trouverait dans le système nerveux central. Dans le cas où les émotions seraient causées par la perception des modifications corporelles, elles relèveraient des cortex sensoriels. L'émotion résulterait de l'événement et déclencherait ensuite la réaction comportementale. Il y a donc indépendance entre expérience émotionnelle et expression émotionnelle. Leur théorie est aussi appelée thalamique de l'émotion en raison du rôle important des structures thalamiques. Les travaux de James, Lange et Cannon sont à l'origine de différentes études sur le rôle des réponses périphériques et la légitimation des structures corticales qui prennent part au processus émotionnel. Quid des réactions physiologiques ? Causes ou conséquences ? Nous verrons que dans les grands courants modernes émerge une théorie pour tenter de résoudre le débat. Il s'agit du concept d'évaluation cognitive encore appelée « appraisal » posée par M. Arnold en 1960 et R. Lazarus en 1970 où ils expliquent la dynamique d'un événement.

Les premières propositions de circuit cérébral émergent avec James Papez (1883 – 1958). Il propose un circuit comme mécanisme émotionnel, responsable des émotions et de leur contrôle. Ce circuit porte le nom de circuit de Papez-Jakob car, quelques années auparavant, Christofredo Jakob (1866 – 1956) a montré sa portée dans les émotions. Les figures ci-dessous montrent le circuit aussi bien sur une coupe du cerveau que schématiquement. Paul Mc Lean (1913 – 2007), médecin et neurobiologiste, affinera le système par la suite en y intégrant la mémoire émotive. Il propose une théorie évolutionniste du cerveau, le cerveau viscéral dit triunique (reptilien, limbique et néocortex) et pose le concept de système limbique. Nous y reviendrons dans la partie consacrée à l'anatomie et la biologie.

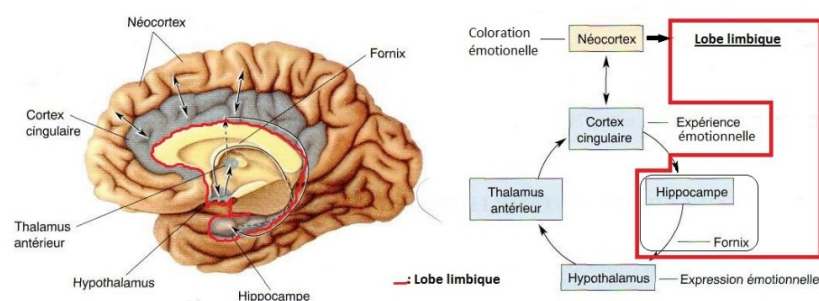


Figure 3 : Circuit de Papez

²⁶ Il a développé le principe de l'homéostasie précédemment nommé milieu intérieur par Claude Bernard (1813 – 1878), médecin physiologiste.

Dans cette figure les flèches schématisent le circuit.

Le schéma ci-dessous montre que l'émotion n'est pas générée seulement par l'hypothalamus. En effet, elle implique des structures sous-corticales : le thalamus agit comme une station relais sensorielle, traite les informations du stimulus émotionnel, l'hypothalamus génère la réponse corporelle au stimulus émotionnel, le cortex cingulaire (2) génère l'état de sentiment subjectif. Des expériences ou des sentiments émotionnels surviennent lorsque le cortex cingulaire intègre ces signaux de l'hypothalamus avec des informations provenant du cortex sensoriel. La sortie du cortex cingulaire vers l'hippocampe (3) puis vers l'hypothalamus (4) permet un contrôle cortical descendant des réponses émotionnelles.

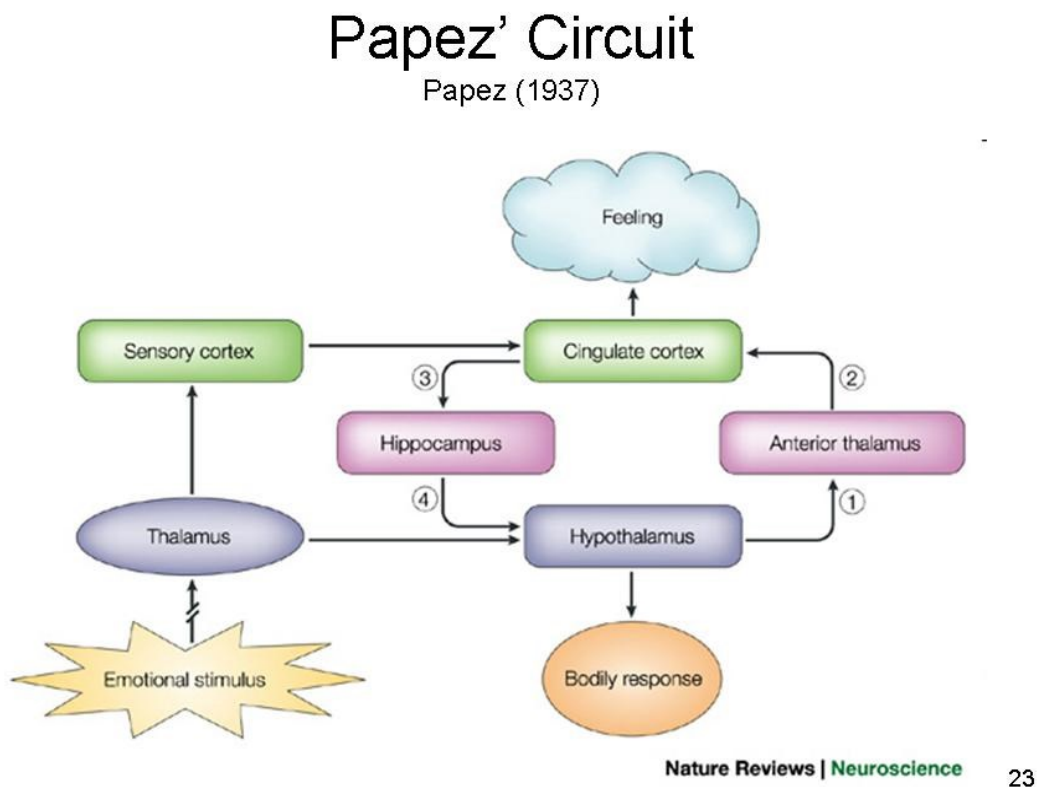


Figure 4 : Circuit de Papez à partir d'une émotion

https://www.ocf.berkeley.edu/~jfkilstrom/IntroductionWeb/emotion_supplement.htm - consulté le 30 juillet 2018

Les défenseurs de ces théories admettent qu'il existe un processus de traitement se décomposant en causes et conséquences. Les composantes de la manifestation étudiée seraient « *un événement (externe ou interne), la perception (ou l'imagination) de cet événement, une large gamme de*

réactions corporelles et de tendances à l'action, et un sentiment subjectif» comme l'indiquent David Sander et Klaus R. Scherer dans le Traité de psychologie des émotions que nous présentons en 1.2.3.2.

1.2.3.2. Les grands courants modernes

Les grands courants modernes regroupent plusieurs modèles. On peut considérer que la période couverte démarre à la deuxième moitié du 20^{ème} siècle. Les théories sont les suivantes :

- **Théorie de la rétroaction** (feedback) corporelle portant sur l'expression et le ressenti émotionnels - Cette théorie est issue de celle de James (1892). Un processus déclenche une réaction émotionnelle et la différenciation se concrétise par la spécificité de cette réaction. Soussignan (2002) a travaillé sur l'hypothèse de la rétroaction faciale en utilisant le sourire de Duchenne i.e. il a expérimenté des simulations de sourires par électrostimulations.



Figure 5 : Simulation électrique des expressions faciales par Duchenne de Boulogne

Le savant Français Duchenne de Boulogne (photo ci-dessus) a simulé les expressions faciales des émotions par la stimulation électrique de certains muscles faciaux (Mécanisme de la physionomie humaine ou analyse électro-physiologique de l'expression des passions par G.-B. Duchenne (de Boulogne). 2^{ème} édition, 1876)

- **Théorie bifactorielle** - S. Schachter (1922 – 1997), psychologue américain, a bien montré l'importance des études faites par James – Lange et Cannon – Bard quant au rôle de la cognition dans l'émotion et est un pionnier en matière de sciences affectives. Il est le fondateur de la théorie « two-factors theory of emotion ». Cette théorie a beaucoup influencé l'approche cognitive. Un processus déclenche une réaction corporelle et la différenciation se concrétise par une interprétation cognitive. Il avance que les émotions ont deux composantes : l'activation physiologique (arousal) et l'étiquetage cognitif i.e. l'attribution d'un nom se rapportant à l'émotion ressentie en fonction de l'environnement, de la situation déclenchante. S. Schachter et Singer (1962) ont écrit « C'est la cognition qui détermine si l'état d'activation physiologique sera labellisé comme "colère", "joie", "peur", ou autre ».
- **Théorie adaptationniste** – De nombreux psychologues et chercheurs comme Seligman, Ohman, Dolan, Olsson, Wundt, Russell, Lang, Cacioppo ont étudié certaines théories de l'émotion qui se focalisent sur le fait que l'homme moderne est le produit d'adaptations auxquelles nos ancêtres ont fait face durant l'évolution. Cette approche s'oriente vers l'application des principes de la biologie évolutionniste aux recherches sur la structure de l'esprit humain : « adaptation psychologique ». Il existerait différentes classes d'émotions selon Ledoux (1996) qui seraient issues de systèmes neuronaux différents. Ohman (1999) indique que les différents systèmes d'émotions, compte tenu de leur histoire, devraient être considérés comme indépendants. Un processus déclenche et différencie l'émotion dont la conséquence est décrite par W.M. Wundt (1832 – 1920), psychologue, philosophe, un des concepteurs et développeur de la psychologie expérimentale. Ses innovations méthodologiques sont précurseurs de procédés fondamentaux pour la psychologie scientifique. Ses travaux portent sur la perception sensorielle dans lesquels il intègre l'utilisation des statistiques et ses nouvelles méthodes.
- **Théorie des émotions de base** - Paul Ekman (1934 -), psychologue, est un des pionniers à s'être intéressé aux mécanismes des émotions. Il œuvre depuis une cinquantaine d'années dans ce domaine et a conçu un système d'association des expressions faciales à leur signification car les émotions s'extériorisent, entre autres, par ce biais. Un système modulaire comme par exemple un module de peur déclenche et différencie l'émotion à partir de conditions d'évolution spécifiques. Grâce aux mouvements musculaires de la face, il a établi que les émotions ne sont pas culturelles mais biologiques et de ce fait sont universelles. Dans les années 1970, avec Wallace

Friesen, il a classé dans son « Facial Coding System (FACS) environ 10 000 expressions différentes fondées sur l'anatomie des muscles faciaux. Six émotions de base font plutôt consensus : la peur, la colère, la joie, la tristesse, le dégoût et la surprise.

- **Théorie psycho-évolutive** – Robert Plutchik (1927 – 2006), psychologue, a mis en place une des théories de classification des émotions (1980) connue sous le nom de théorie psycho-évolutive. Elle s'appuie sur dix postulats qu'il expose dans son ouvrage « Emotion – A psycho-evolutionary synthesis ». Il a conçu une roue des émotions afin de montrer leurs nuances. Deux modèles illustrent les relations entre émotions (figure 6) : une en 2D et l'autre en 3D, plus complexe. Il propose huit émotions de base, opposées deux à deux, dont quatre (confiance ou attirance, dégoût, anticipation et surprise) émanent des quatre autres (peur, colère, joie et tristesse). Ces émotions seraient le résultat d'un mécanisme biologique et s'identifient à partir de trois critères : leur intensité, leur similitude et leur « bipolarité ».

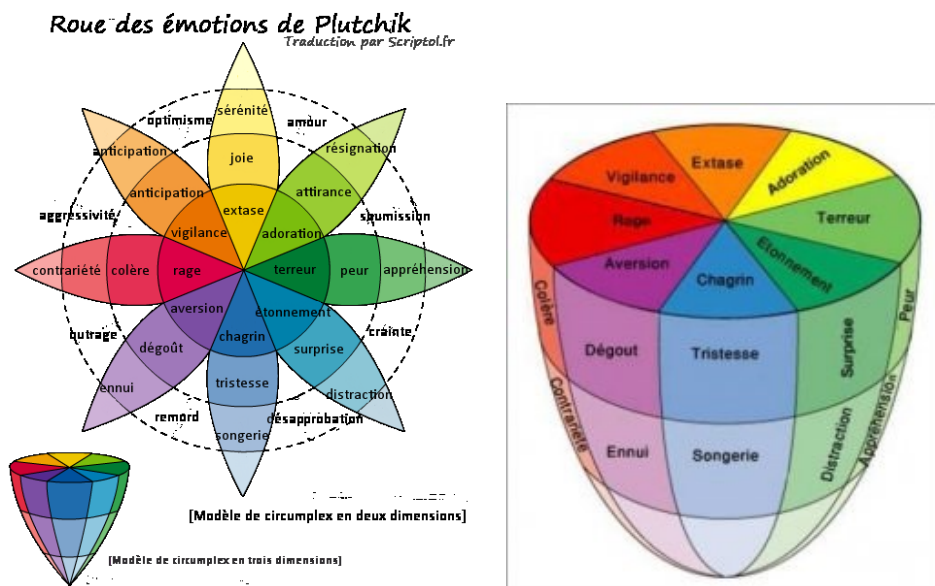


Figure 6 : Relation entre émotions

<https://www.scriptol.fr/robotique/plutchik.php> - consulté le 9 août 2018

Le deuxième schéma représente le modèle 3D avec une intensité grandissante du bas vers le haut.

- **Théorie dimensionnelle** – Selon Russell (1980), il serait possible de représenter les émotions autour d'un cercle selon deux axes représentant les dimensions : valence et

activation. J. A. Russell (1980) présente dans l'article un modèle selon 28 types figure 7 ci-dessous. Il s'agit d'une formalisation mathématique de la représentation de la structure mentale de stimuli.

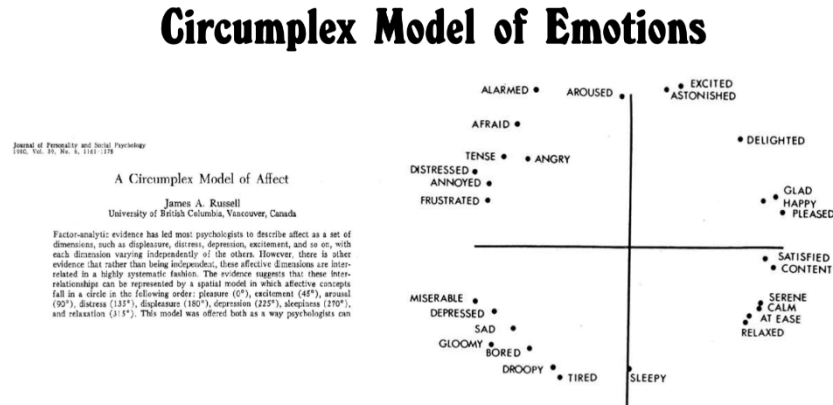


Figure 7 : Représentation des émotions selon J.A. Russell

On trouve aujourd'hui différents graphiques sur le même modèle.

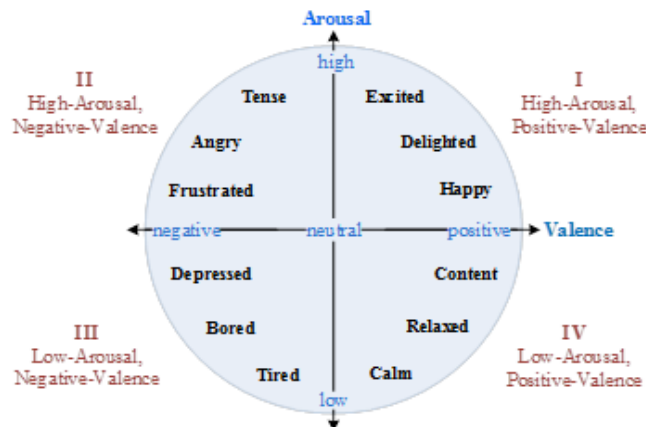


Figure 8 : Autre représentation des émotions en cercle

http://nlp.innobic.yzu.edu.tw/tasks/dsa_w/ - consulté le 21 août 2018

Un processus déclenche et différencie l'émotion dont la conséquence est donnée à partir de dimensions de valence et d'activation. On parle de « core affect » comme une partie centrale du processus. Wundt (1904) a cherché à généraliser les sensations jusque-là déclinées selon deux attributs : la qualité et l'intensité. En attribuant une coloration affective, il décrit l'état émotionnel selon trois dimensions : 1) envie/aversion ou plaisir/déplaisir, 2) excitation/apaisement ou excitation/dépression

et 3) tension/soulagement ou tension/relaxation. Pour Russell (1980), une émotion se manifeste par la série de ses diverses composantes, expressives-comportementales, physiologiques et subjectives. C. E. Osgood (1957) a proposé l'existence de trois dimensions fondamentales pour la description des affects : 1) Evaluation (négatif ↔ positif) 2) Activation (faible ↔ forte) 3) Puissance (faible ↔ forte). Ce modèle est parfois appelé le modèle EPA (Evaluation, Potency, and Activity).

Il existe des problèmes importants concernant cette approche, il n'y a pas de consensus et au moins quatre points de vue différents. Géraldine Coppin et David Sander (2010) présentent des critiques intéressantes relatives à cette théorie dans « Système d'interaction émotionnelle ».

- **Théories de l'évaluation cognitive** (appraisal, composants) (Lazarus, Scherer, Sander ...). Richard Lazarus (1922 – 2002) a proposé cette théorie en 1984. L'évaluation cognitive est divisée en deux étapes : l'évaluation primaire, signification positive ou négative d'un événement et l'évaluation secondaire, capacité de faire face à des conséquences. Ces deux évaluations se déroulent en même temps. Le traitement de l'information est souvent utilisé afin d'identifier le rôle de la cognition dans l'émotion. Cette théorie comme celle des émotions de base propose la fonction adaptative des émotions. Frijda (1986) apporte un éclairage sur les émotions, en particulier, il parle d'une phase préparatoire à l'action induite par l'évaluation de la pertinence de l'événement. En 2007, Frijda, tout comme Scherer et Grandjean, note que pour qu'une émotion soit déclenchée, il faut que l'événement soit important pour l'individu. Deux points importants de l'évaluation cognitive, donnés par Grandjean et Scherer (2009), sont qu'un événement doit être important pour l'individu pour susciter une émotion et que le processus évaluatif doit être rapide. Nous constatons que l'importance de l'événement pour l'individu est essentielle et montre que chaque sujet réagit différemment à un stimulus.

Les schémas annexes 2 et 3 (Différents schémas de processus émotionnels et Différentes théories des émotions (Chapitre 1)) récapitulent les grandes lignes des courants modernes.

Comme nous pouvons le constater, le domaine des émotions est très étendu et bien difficile à définir. Le vocabulaire est riche, des mots comme émotions, sentiments, affects ... ont souvent des significations différentes suivant le contexte et/ou le champ d'application ou parfois semblables. Les processus liés à l'expression de l'émotion sont aussi variés.

Pour certains, émotions et passions sont synonymes pour d'autres non. Le terme émotion sert souvent de label pour parler de manifestations affectives. Mais comment définir ces manifestations affectives ? La situation est assez confuse et les choix se font arbitrairement. Se référer aux usages les plus courants peut sembler une bonne décision. Le mieux est d'être le plus précis possible dans le vocable retenu dans chaque cas d'utilisation.

Armelle Nugier, dans « Histoire et grands courants de recherche sur les émotions » (2009), nous indique qu'« Aujourd'hui les théoriciens qualifient l'émotion de phénomène multicomponentiel adaptatif (avec plusieurs composantes) pouvant être caractérisé par les réactions expressives, comme le sourire, le froncement de sourcil, l'intonation de la voix, la posture ; par les réactions physiologiques comme la fréquence cardiaque, le flux sanguin, la production des larmes ; par les tendances à l'action et les réactions comportementales, comme l'attaque, l'évitement, la fuite, la recherche de support social ; par les évaluations cognitives comme la pensée d'avoir été injustement traité par une autre personne ; et enfin par l'expérience subjective (ou sentiments subjectifs), c'est-à-dire ce qu'on pense ou dit ressentir ». La science et les connaissances progressent, le sujet est approfondi et la vision de l'émotion se fait un peu plus précise. Le schéma ci-dessous propose une représentation du processus en composantes.

Les composantes du processus émotionnel

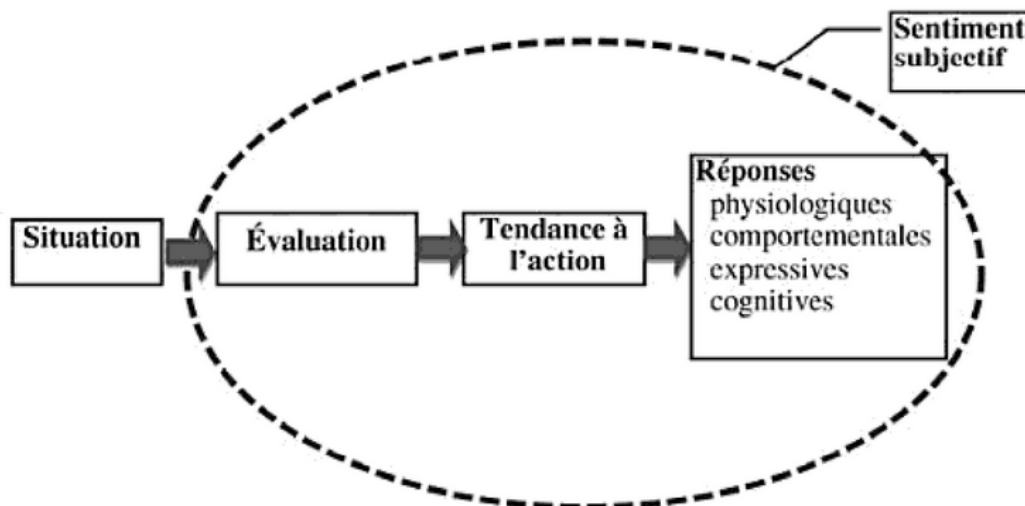


Figure 9 : Composantes du processus émotionnel

Nous pensons qu'aucune de ces théories ne s'opposent réellement, elles sont complémentaires car elles sont issues d'approches différentes. Nous pourrions par analogie dire que leur combinaison reflète l'homéostasie des idées quant aux émotions. Nous pouvons nous tourner vers une approche holiste qui prend en compte les différentes théories plutôt que de les opposer. Souvent, leurs lacunes en matière de considération de notre affectivité i.e. notre vécu émotionnel se font sentir.

L'approche qui en fait mention est la phénoménologie des émotions (Svec, 2013). C'est une approche globale qui conçoit les émotions comme un type de conduite et propose d'intégrer aux théories existantes « l'intentionnalité et l'incarnation des émotions dans un discours unifiant, qui exprime l'identité ontologique de l'esprit et du corps ». Les émotions sont des phénomènes adaptatifs avec des fonctions sociales comme la communication et s'expriment à travers plusieurs modalités telles que le langage, le corps, etc.

Paul Watzlawick et al. (2014) ont traité dans « Une logique de communication » l'étude de la communication humaine. Elle se divise en trois parties : la syntaxe, qui concerne les problèmes de transmission de l'information comme le codage, les canaux de transmission, le bruit, ..., la sémantique, qui concerne le sens, et la pragmatique, qui concerne l'impact sur le comportement. Cette dernière partie traite des mots mais aussi le langage non verbal et le langage du corps. Le principe des auteurs est de ne jamais considérer l'humain comme un être isolé mais comme un élément d'un système de communication plus global. « *Les dysfonctions de la communication induisent un comportement inadapté* »²⁷.

La 1.2.4 aborde succinctement le rôle des émotions dans l'adaptation de l'humain, la façon dont elles se produisent, les modes de reconnaissances au travers des communications et les processus mis en œuvre.

1.2.4. Rôle, déclenchement et reconnaissance des émotions – communications verbale et non verbale ou orale et non orale

1.2.4.1. Rôle des émotions

Les émotions sont des indicateurs. Elles permettent au subconscient de communiquer avec la conscience dans le but de faire réagir, de provoquer une réaction. Chaque émotion a un sens. Une émotion est donc un moyen de communication pour soi-même ou pour les autres.

En règle générale, une émotion agréable correspond à un besoin satisfait et, dans le cas contraire, lorsque l'émotion est désagréable, le besoin ne l'est pas. Comme nous l'avons déjà exprimé, les émotions sont des phénomènes adaptatifs avec des fonctions sociales s'exprimant à travers plusieurs modalités.

Les émotions sont des mécanismes utiles à l'adaptation d'un individu à son environnement, au fonctionnement des processus cognitifs et à la régulation des interactions sociales.

Une émotion comprend cinq composantes :

²⁷ https://www.scienceshumaines.com/une-logique-de-la-communication_fr_13004.html - consulté le 6 août 2018

- l'évaluation cognitive qui se traduit par le fait qu'une émotion exerce une action sur la pensée, une interprétation, une activité du système nerveux central
- l'expression qui se traduit par un mouvement, une émotion participe à la fuite ou au rapprochement
- la tendance à l'action d'un point de vue motivationnel, comportemental qui se traduit par la disposition à répondre à l'événement
- la réponse périphérique qui se traduit par des réponses psychophysiologiques
- le sentiment subjectif qui correspond à l'expérience émotionnelle subjective, appelée feeling et souvent sentiment et qui fait partie de la notion d'émotion.

Les émotions sont des informateurs sur les événements internes ou externes se traduisant selon différentes modalités. Comment surviennent-elles?

1.2.4.2. Déclenchement des émotions

Une émotion se produit lors d'un stimulus externe ou interne spécifique. Par exemple, une pensée, la perception d'une odeur sont des stimuli pouvant engendrer une émotion.

De façon schématique les émotions prennent naissance dans notre cortex au niveau du système limbique.

Il est difficile de fournir un schéma unique illustrant le processus et le parcours d'un stimulus car les circuits suivis diffèrent selon son type et en fonction du vécu. Le schéma ci-dessous présente un exemple de gestion émotionnelle, fléchée de 1 à 5, face à une situation spécifique.

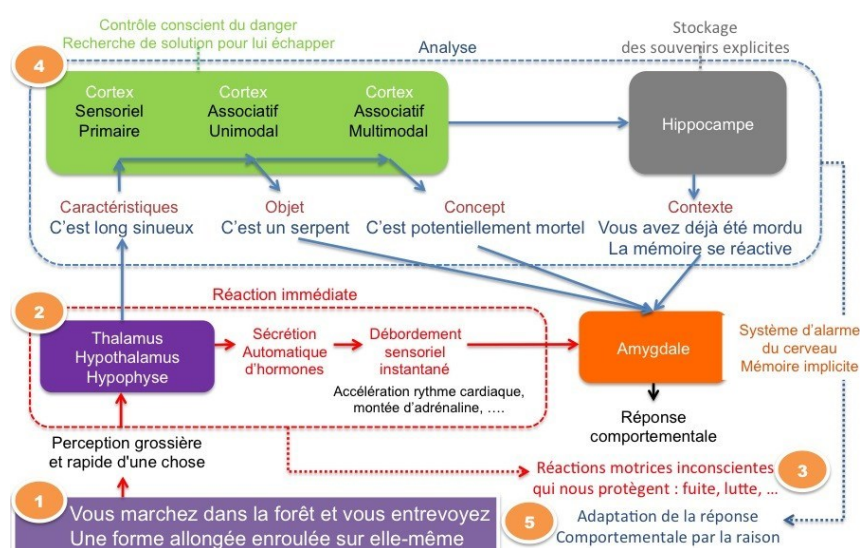


Figure 10 : Processus et parcours d'un stimulus

L'activité émotionnelle est en permanence en action. Les études sur la dynamique des émotions sont assez nouvelles. Cette dynamique comprend deux phases :

- Le déclenchement d'une émotion qui est bivalent : brutal ou progressif. C'est ce que l'on nomme le degré d'explosivité de l'émotion.
- La phase de compensation i.e. l'augmentation ou l'atténuation de l'émotion dans le temps. C'est le degré d'accumulation qui permet d'évaluer les variations.

Les études menées par l'Institut du Cerveau et de la Moelle épinière (ICM) associé à d'autres chercheurs ont été réalisées par Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf). Ils ont montré que les phases de déclenchement et de compensation des émotions sont les deux composantes principales des changements émotionnels perçus dans des régions distinctes du cerveau. On pourra se référer à (Resibois et al., 2017)

1.2.4.3. Reconnaissances verbale et non verbale

Les émotions peuvent se traduire selon plusieurs modalités soit verbale et/ou non verbale comme, par exemple, à travers les mots prononcés ou écrits, par le biais de sons, par les gestes, les mouvements des muscles et également par les variations biologiques internes du corps.

- a. Oral, écrit :** cris, onomatopées, expressions verbales, mots, tout ce qui a trait à la linguistique. La communication verbale est composée de mots d'un langage, émise par la parole ou l'écriture. Elle permet de s'exprimer. Les caractéristiques vocales des émotions ont fait l'objet d'études et montrent que les émotions impactent ces caractéristiques. Au travers des événements émotionnels donnant lieu à des modifications physiologiques, certaines d'entre-elles, comme la tension des cordes vocales ou les perturbations au niveau du pharynx ou du larynx, vont modifier le spectre des signaux énoncés. La production vocale peut ainsi traduire des sons modifiés émotionnellement. (T. Bänziger et al., 2001 ; Grandjean et Baenziger, 2009 ; Vidrascu, 2007).

Les émotions en linguistique sont un sujet abordé seulement depuis environ deux décennies. Des travaux innovants ont été entrepris sur le plan lexical, grammatical et syntaxique. Il est mentionné des « marques linguistiques de l'émotion » énoncées dans la littérature surtout au travers des travaux sur « *les propriétés du lexique des émotions, sentiments ou affects, des travaux sur la sémantique et la dimension culturelle des émotions* (Wierzbicka, 1999 ; Kövecses, 2000), *sur l'émotion dans l'interaction discursive* (Plantin 2000), ou encore sur le rôle des émotions dans le processus d'acquisition du langage ou

d'apprentissage d'une langue seconde (par exemple Ellis 1994). Le terrain reste toutefois largement inexploré ».

Pour plus de détails, on pourra se référer au numéro 180 de « Langue française » coordonné par Chatar-Moumni (2013) ainsi qu'à la présentation sur Hal soumis le 20 mars 2018.

Dans la série « Lie to me », le Dr Cal Lightman est capable de détecter la vérité du mensonge au travers d'indices non verbaux (voir ci-dessous) ou à l'intonation de la voix.

b. Non oral (endogène - exogène), non verbal

Le non verbal est assez complexe et mérite d'être défini. Les travaux de Jurgen Ruesch (1910 – 1995), psychiatre, sémioticien, sur la théorie de la communication en général et sur le non verbal avec Weldon Kees (1914 - 1955), artiste, ont démarré dans les années 50. Ceci a beaucoup influencé les études de J. Ruesch sur les maladies psychosomatiques et le stress. Il est classé en cinq catégories élémentaires²⁸ : **le péri-verbal**, qui concerne le temps et l'espace dans la communication, **le para verbal**, qui est composé des sons produits lors des communications, à savoir le ton, le timbre l'intonation de la voix, **l'infra-verbal**, qui concerne les codes non décodables consciemment, comme les odeurs ou les couleurs, **le supra-verbal**, qui concerne les signes distinctifs comme les tenues vestimentaires, les bijoux, etc, **le pré-verbal** qui concerne tout ce qui est mis en œuvre à l'insu de la conscience avant même que nous prenions la parole et qui prend appui sur le langage corporel.

Albert Mehrabian (1971), professeur en psychologie de l'université de Californie, met en avant le fait qu'il faut s'attacher à l'aspect non-verbal, pour décoder la communication entre personnes, qui constitue la plus grande partie des transmissions d'informations. Il quantifie la communication de la façon suivante : 7 % est verbale (mots), 38 % est vocable (intonation, ton et timbre de la voix) et 55 % est visuelle (expression du corps, le non-verbal)²⁹ mais il faut replacer ses dires dans son contexte. La quantification n'est pas aussi simple. L'étude réalisée porte sur un échantillon très petit donc insuffisant pour une généralisation mais elle constitue une base de travail.

Dans la communication non verbale, il est classé tout ce qui a trait à la communication non orale comme les signaux exprimés par le visage, le comportement, la gestuelle, les régulations hormonales. Ces signaux peuvent être ou non contrôlés par l'individu observé. Nous donnons ci-après quelques commentaires sur ces expressions :

²⁸ <http://non-verbal.synergologie.org/nonverbal/communication-non-verbale/les-5-premieres-dimensions-du-non-verbal> - consulté le 6 août 2018

²⁹ <https://www.synergologie-qc.ca/quest-ce-que-la-synergologie/> - consulté le 19 mai 2018

- Expressions faciales, micro-expressions

Nous avons évoqué précédemment les études réalisées sur les expressions faciales. Elles constituent un mode de communication et peuvent traduire des émotions. Elles mettent en mouvement, pour chaque émotion, un certain nombre de muscles. Les micro-expressions sont des expressions faciales de très courte durée, moins d'une seconde. Elles apparaissent lorsque les enjeux situationnels sont très élevés. Ces micro-expressions sont données comme étant fiables dans les analyses non verbales car il est quasiment impossible de les feindre. On les retrouve dans les travaux de Paul Ekman qui ont fait l'objet de la série « lie to me », citée plus haut, dans laquelle un expert de la communication non verbale est en particulier capable de détecter les mensonges par ces expressions faciales et aussi par les attitudes corporelles que nous présentons maintenant.

- Comportement, attitudes, langage corporel

Nos postures, nos gestes sont autant de signes parfois plus expressifs que nos paroles. Ils font l'objet du comportementalisme encore appelé behaviorisme et sont très utilisés, par exemple, dans des psychothérapies cognitivo-comportementales (TCC – Thérapie Cognitivo Comportementale) et dans l'analyse appliquée du comportement.

- Réactions physiologiques.

Lors d'une émotion, des phénomènes physico-chimiques se produisent dans le corps. Il est possible de ressentir par exemple une chaleur au niveau des joues, de percevoir une accélération du cœur, d'avoir les mains moites ... Ces manifestations sont dues au fonctionnement du corps humain dans son environnement. Nous présentons dans la partie III les connaissances utiles à cette compréhension, concernant plus précisément les marqueurs choisis.

Des travaux comme la théorie du contrôle de l'affect (Heise, 1979 ; Smith-Lovin et al., 1988 ; McKinnon, 1994) ont réussi à tenir compte des systèmes verbaux et non verbaux en particulier dans l'interaction sociale mais aussi du rôle de la cognition et des affects dans l'expérience émotionnelle.

1.2.4.4. Méthodes de détection des émotions

Différents chercheurs ont mis en place des techniques afin d'estimer ou plutôt détecter les émotions lors d'expérimentations. Il y a deux classes de méthodes : les méthodes subjectives dites à questionnaire et les méthodes objectives à base de mesures physiologiques ou comportementales.

a. Méthodes subjectives

Parmi les méthodes subjectives, on trouve les techniques de : - Bradley et Lang « **self-assessment manikin** » (SAM) (Bradley et Lang, 1994), figure 11. Il s'agit d'une technique d'évaluation visuelle non verbale à base de pictogrammes que le sujet renseigne. Cela mesure le plaisir, l'excitation et la dominance associés au stimulus. - Betella et Verschure (2016) ont développé un outil l'« **affective slider** » (AS) qui est une échelle numérique pour l'auto-évaluation de l'émotion, figure 12. Il s'agit de deux curseurs indépendants qui mesurent le plaisir et l'excitation et qui sont renseignés par le sujet.

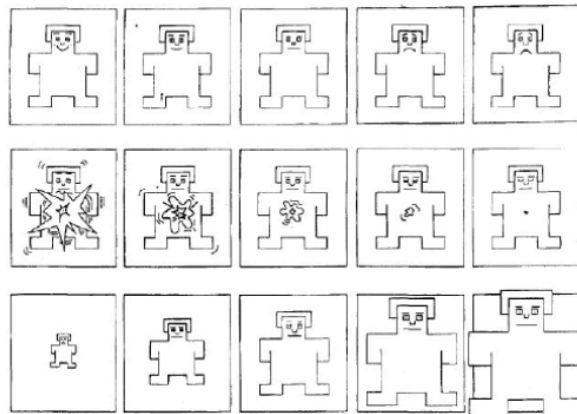


Figure 11 : Self-Assessment Manikin (SAM)

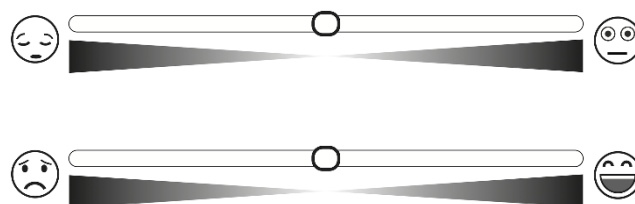


Figure 12 : Affective slider (AS)

b. Méthodes objectives

Les méthodes objectives portent sur des mesures biologiques difficilement contrôlables par les individus.

La technique la plus répandue est celle d'Ekman, Friesen et Ancoli (1980) avec un système de codage d'expressions faciales (FACS – facial action coding system) qui décrit le mouvement de chaque muscle impliqué dans les expressions faciales. Ces mouvements sont décomposés en unités d'action (AU) au nombre de 46. Les combinaisons des contractions ou décontractions des muscles faciaux expriment les émotions. La figure 13 illustre six émotions de base.

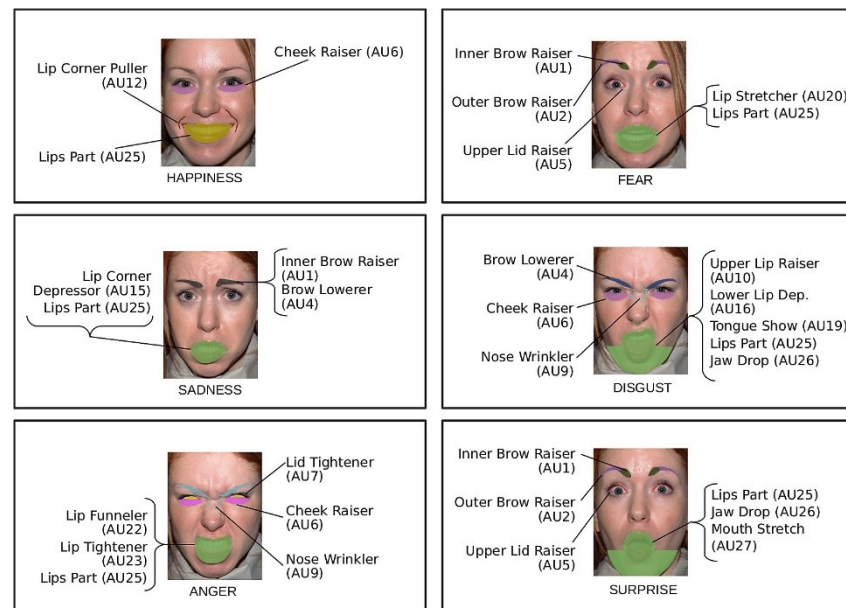


Figure 13 : Détection des émotions suivant la classification de Ekman

extrait de <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0177239> -consulté le

21 août 2018

Un individu bien entraîné peut maîtriser d'une certaine façon ce type d'expression rendant l'exploitation biaisée.

Différentes études du comportement et des variations physiologiques sont en cours. Elles sont assimilées à une vision objective. Il s'agit de relevés de mesures sans développement d'outil particulier, pour l'instant.

Les auteurs de « Lecture de textes émotionnels : Effets sur la compréhension, les mouvements oculaires et la posture du corps » (Ballenghein, Megalakaki & Baccino, 2018) expliquent comment l'émotion ressentie par le lecteur se manifeste par des mouvements oculaires et posturaux pouvant impacter la lecture et la compréhension du texte.

Les travaux menés sur les données physiologiques n'ont, jusqu'à présent, pas encore abouti. Nous pouvons citer l'étude de S. Balters et M. Steinert (2017) servant d'appel à recherche dans le domaine de l'ingénierie affective dans laquelle ils indiquent que

l'utilisation de capteurs pour l'acquisition de données physiologiques permet de mesurer l'évolution des différentes variations biologiques mais qu'un travail d'interprétation au niveau émotionnel reste à engager. La clé de la compréhension de l'expérience utilisateur ainsi que la conception de modèles intégrant des états émotionnels consiste dans la compréhension et les mesures physiologiques. Ce qui fait l'objet de cette thèse depuis 2012.

1.2.5. Psychophysiology des émotions

La psychophysiology est l'étude des relations physiologiques et psychiques. Elle nous concerne au plus haut point puisque nous cherchons à étudier les liens entre les variations physiologiques et les émotions.

Les systèmes physiologiques sont nombreux mais ceux impliqués dans la dynamique des émotions sont principalement :

- Le système cardiovasculaire (fréquence cardiaque, pression artérielle ...)
- Le système respiratoire (volume respiratoire, fréquence respiratoire ...)
- Le système glandulaire (sécrétion des glandes salivaires, des glandes sudoripares, messages chimiques ...)
- Le système musculaire (mouvements, postures ...)
- Le système immunitaire (les ganglions lymphatiques, la rate, le thymus et la moelle osseuse sont sollicités par le cerveau pour produire les anticorps, pour détruire les éléments étrangers à l'organisme ...). Il y a également la peau comme système de défense.
- Le système nerveux (signaux électriques, neurotransmetteurs ...)
- Le système digestif (système nerveux entérique, fibres nerveuses ...)

Tous ces systèmes sont en interaction et participent à l'homéostasie en faisant varier les taux hormonaux, les données physiologiques diverses, la contraction de la pupille (myosis) ou inversement (mydriase), les mouvements en fuyant ou en changeant de posture ... Vouloir mesurer les variables évoluant dans ces systèmes nécessitent des techniques différentes.

En ce qui nous concerne, c'est la dimension émotionnelle qui nous intéresse. Cette dimension comprend trois grandes composantes (voir schéma ci-après) : la composante subjective qui se traduit par l'évaluation que le sujet se fait de son état, la composante comportementale et expressive qui se traduit par des variations des expressions faciales, des modifications de la voix et des changements de posture et, enfin, la composante physiologique, qui se traduit par des modifications des variables citées plus haut et sur laquelle nous nous focalisons.

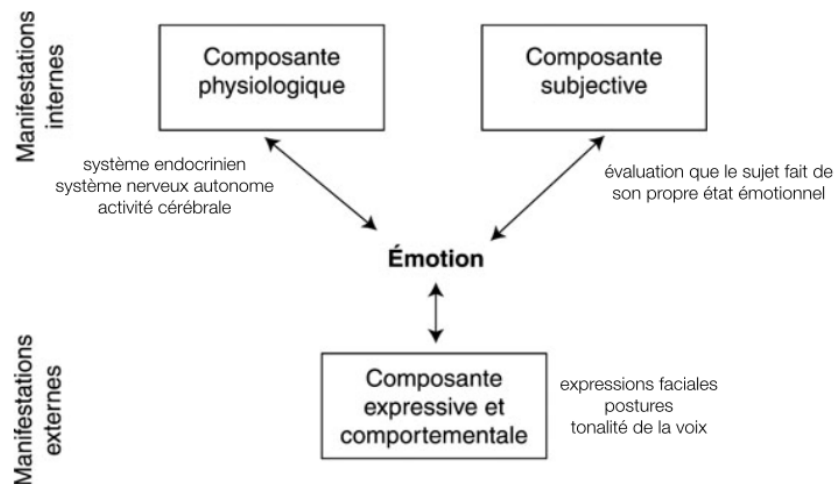


Figure 14 : Les trois grandes composantes de la dimension émotionnelle

<https://uxmind.eu/2015/04/09/evaluer-les-emotions/> - consulté le 25 août 2018

Le recueil des données se fait par prélèvements, par enregistrements psychophysiologiques qui sont la réception d'un signal pouvant provenir d'un capteur, d'une électrode ... Il s'agit d'une transformation d'une donnée physique en une donnée électrique. Il y a également l'amplification du signal et les filtres nécessaires à l'obtention d'un bon signal pouvant être utilisé. Il faut ensuite enregistrer ces informations. Pour cela il est procédé au stockage du signal afin d'être en mesure de l'analyser. Nous abordons cette partie dans le chapitre consacré aux données.

1.3. Emotions, anatomie et biologie

Pour comprendre le phénomène des émotions, il faut comprendre le système humain. Nous allons donc aborder une partie de l'anatomie humaine et son fonctionnement (Pocock, Christopher, 2004) afin de pouvoir relier ce système aux différents dispositifs actifs utilisés dans nos expériences. Mais il est nécessaire d'expliquer en quelques lignes quels sont les processus de perception qui traitent les informations reçues.

1.3.1. Perception et processus de perception

Il est sans doute essentiel de parler de perception et de processus de perception sans lesquels la compréhension de ce qui nous entoure ou ce qui est en nous n'auraient pas de sens. Bien sûr nous pouvons très bien vivre sans savoir ce qui se passe. Dès que nous nous interrogeons sur nous, notre

place, notre rôle ... cette connaissance ou cette approche peut nous éclairer sur notre fonctionnement. Mieux nous comprendre commence par mieux nous connaître.

Les modalités somato-sensorielles ou somesthésiques comportent trois systèmes distincts : le système extéroceptif qui traite les stimuli externes appliqués à la peau, le système proprioceptif ou proprioception qui traite les informations sur la position du corps provenant de récepteurs dans les muscles, les tendons, les articulations et les organes de l'équilibre, le système intéroceptif qui traite les informations générales sur l'état interne du corps comme la température interne et la pression artérielle.

Le système extéroceptif comporte trois sous-systèmes qui s'occupent de la perception des stimuli mécaniques par le toucher, la perception des stimuli thermiques par la température et la perception des stimuli nociceptifs par la douleur. Notre étude utilise des capteurs de peau, il est donc essentiel de connaître son fonctionnement.

Les stimuli traités par l'organisme proviennent des organes de perceptions externes que sont les organes des sens et internes par les organes internes comme par exemple la thermoréception centrale se situant, entre autre, dans la paroi des organes intra-abdominaux. Les stimuli externes sont perçus par les sens, interfaces entre l'environnement et le corps. Pour traiter les informations provenant de l'environnement, l'humain dispose d'un système sensoriel élaboré composé de modules spécialisés. Il y a trois grandes classes de perceptions :

- La sensorialité proprioceptive qui concerne les sensations provenant de l'étirement des muscles et tendons.
- La sensorialité intéroceptive concerne les sensations provenant des organes internes. Elle est inconsciente sauf dans le cas de la douleur. Elle nous concerne en partie. Les émotions ou états ressentis transitent par différentes zones de notre corps : des viscères comme le ventre, le cœur, le foie, le cerveau, les surrénales ...
- La sensorialité extéroceptive, qui nous intéresse également, concerne les sensations provenant du monde extérieur via nos six sens : l'audition, l'odorat, la vision, le toucher, le goût et enfin la sensibilité statique ou labyrinthique. La multi-modalité sensorielle s'exprime grâce à des stimuli pertinents sous forme d'énergie mécanique, électromagnétique ou chimique offerts aux organes sensoriels.

Tout commence par un stimulus.

Nous avons précédemment présenté les systèmes physiologiques impliqués dans les émotions, nous présentons de façon un peu plus approfondie les structures biologiques se rapportant à notre

étude, à savoir le système nerveux, le système cardiaque, le système pulmonaire et le système cutané.

Comme nous l'avons déjà signalé, le corps cherche l'équilibre appelé homéostasie. C'est le système nerveux autonome (SNA) qui la régule.

Voyons comment les éléments essentiels sur lesquels repose l'étude se structurent et fonctionnent.

1.3.2. Le système nerveux et les relations avec les émotions : anatomie, fonctionnement et techniques de mesures

Le système nerveux est constitué d'un ensemble complexe de nerfs et de cellules spécialisées, les neurones qui transmettent l'influx nerveux entre les différentes parties du corps et le cerveau. Il représente une sorte de câblage chimico-électrique du corps en transmettant des signaux électriques via des combinaisons chimiques.

Le système nerveux contrôle les actes volontaires comme les mouvements conscients et involontaires comme les actes réflexes, les battements cardiaques. Il échange des signaux avec les différentes parties du corps.

1.3.2.1. Anatomie

Le système nerveux est composé de deux grandes parties (voir figure 15) :

- Le **système nerveux central** (SNC) constitué de l'encéphale (cerveau, cervelet et tronc cérébral) et de la moelle épinière.
- Le **système nerveux périphérique** (SNP) situé à l'extérieur de la cavité crânienne et du canal rachidien et constitué des nerfs crâniens, des nerfs spinaux ou rachidiens émergents du canal rachidien. Il comprend des voies nerveuses qui véhiculent les informations afférente ou sensitive et efférente ou motrice. La voie sensitive afférente relaie vers le SNC les informations reçues de récepteurs situés dans la peau, les muscles, les poumons ... La voie motrice efférente est soit somatique, soit végétative. Elle transmet la réponse du SNC à l'effecteur c'est-à-dire aux organes ou aux muscles. La boucle, ainsi réalisée, est appelée arc réflexe (voir figure 18). Elle participe à la régulation de l'homéostasie. Le SNP se décompose en deux sous-systèmes :
 - Le système nerveux somatique qui relie l'organisme à son milieu ambiant et est responsable de tout ce qui est volontaire.

- Le système nerveux végétatif ou autonome (SNV ou SNA), divisé lui-même en système sympathique ou orthosympathique et système parasympathique qui innerve le muscle cardiaque, les muscles lisses et les glandes. Le système sympathique est responsable de toute l'activité inconsciente de l'organisme et provoque l'augmentation de la fréquence cardiaque, la dilatation des pupilles, les mouvements gastriques et intestinaux, la pilo-érection et la pâleur. Les nerfs sympathiques agissent sur la dépense d'énergie de l'organisme au vu des situations de danger ou d'éveil. Le système parasympathique quant à lui engendre des effets opposés au système sympathique. Les nerfs parasympathiques agissent sur la phase de récupération. Les schémas A et B (figures 16 et 17) illustrent les phénomènes liés aux systèmes parasympathique et sympathique.

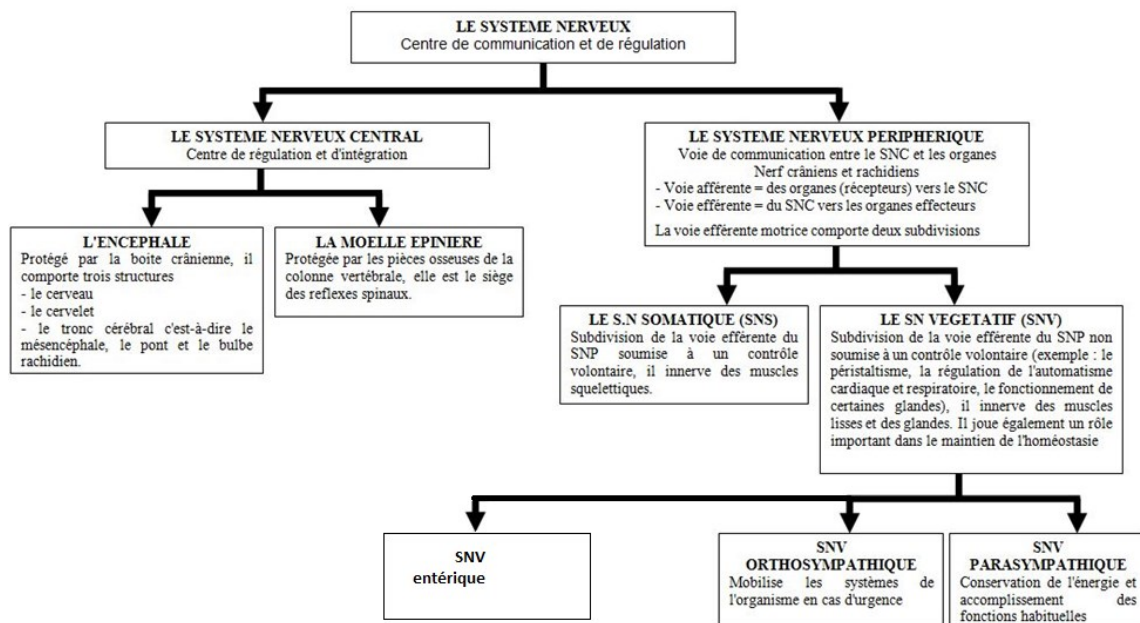


Figure 15 : Les subdivision du système nerveux

<https://blog.cognifit.com/fr/systeme-nerveux/> - consulté le 2 septembre 2018 et modifié

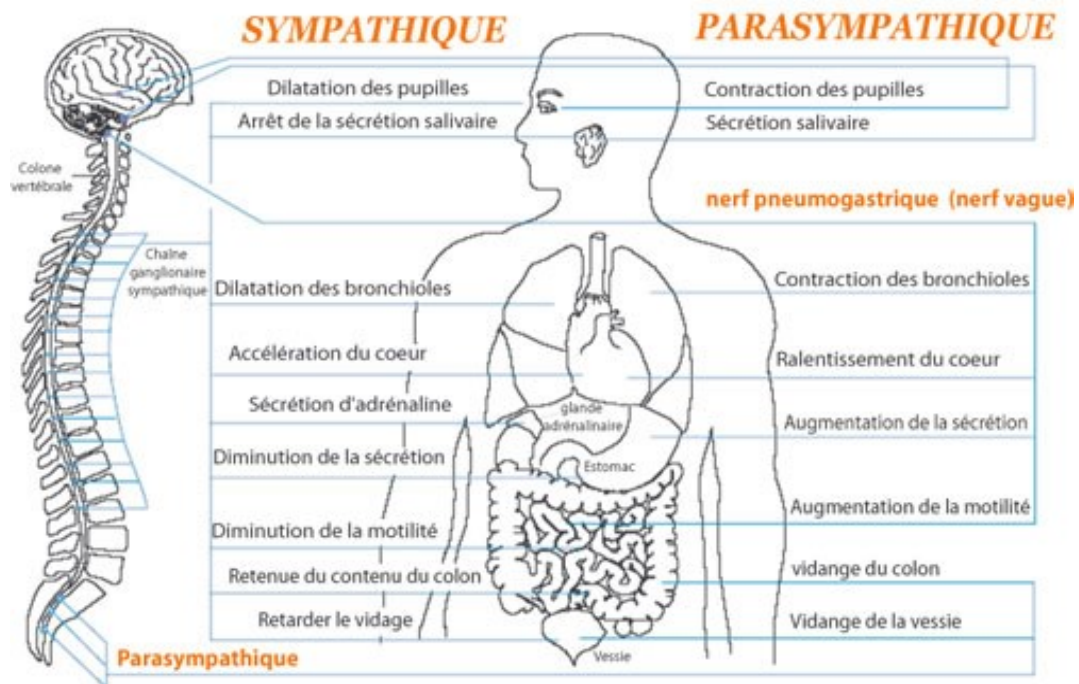


Figure 16 : Schéma A

<https://i60.servimg.com/u/f60/13/50/50/21/fondem10.jpg> - consulté le 9 août 2018

Organe effecteur	Effet parasympathique	Effets sympathique
Pupille	Constriction	Dilatation (α)
Glandes salivaires	Sécrétion aqueuse	Mucus, enzymes (α et β_2)
Coeur	Baisse de la fréquence	Augmentation de la fréquence et de la force de contraction (β_1)
Artérioles et veines	-----	Constriction (α) ou dilatation (β)
Poumons	Bronchoconstriction	Bronchodilatation (β_2)
Système digestif	Motilité et sécrétion augmentées	Motilité et sécrétion diminuée (α et β_2)
Pancréas endocrine	Augmente la sécrétion d'insuline	Baisse la sécrétion d'insuline (α)
Pancréas exocrine	Augmente la sécrétion enzymatique	Diminue la sécrétion enzymatique (α)
Rein	-----	Augmente la sécrétion de rénine (β_1)
Vessie	Favorise la miction	Favorise la rétention urinaire (β_1)
Organes sexuels	Erection	Ejaculation (α)
Utérus	Variable selon la phase du cycle	Variable selon la phase du cycle
Tissu adipeux	-----	Catabolisme lipidique (β)
Glandes sudoripares	-----	Augmente la sudation (α)

Figure 17 : Schéma B – Effets du système végétatif sur les principaux organes

<http://ressources.unisciel.fr/physiologie/co/grain5b5c.html> - consulté le 12 octobre 2018

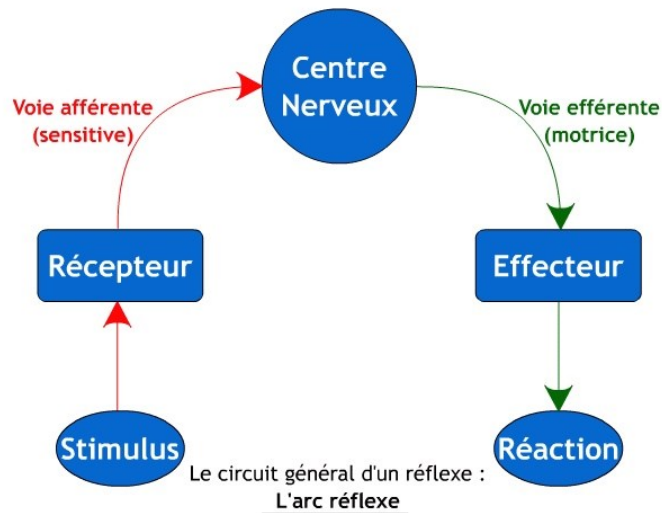


Figure 18 : Arc réflexe

<http://lesreflexes-tpe.e-monsite.com/pages/i-qu-est-ce-qu-un-reflexe.html>, consulté le 2 septembre 2018

Lorsque nous avons abordé le circuit de Papez, dans les courants classiques de la théorie des émotions, nous avons introduit le concept de système limbique de P. Mc Lean. C'est le moment d'y revenir.

Paul Mc Lean émet que le cerveau était composé de trois parties (cerveau triunique) : le cerveau reptilien, le néocortex et le système limbique (voir le schéma ci-dessous). Le système limbique fut longtemps considéré comme le centre des émotions. Ce système est impliqué dans d'autres fonctions comme la mémoire, les comportements alimentaires, l'olfaction, le SNA...

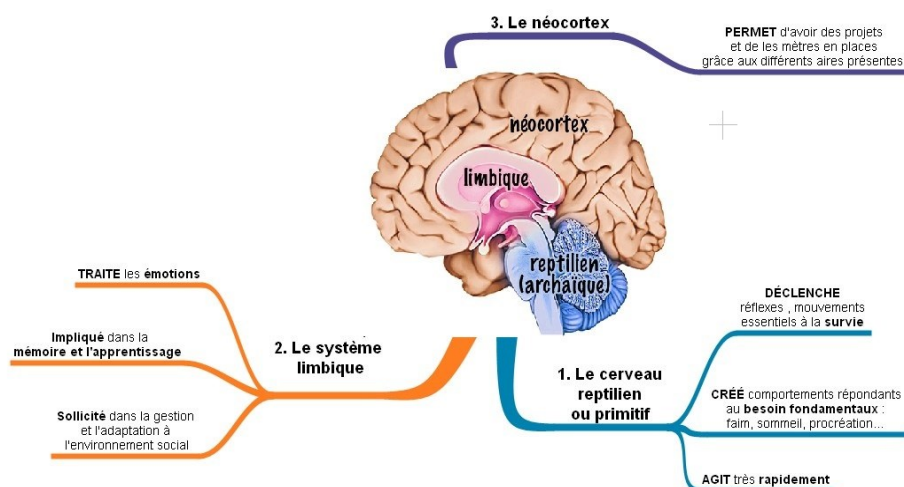


Figure 19 : Le cerveau triunique de McLean

<https://www.youtube.com/watch?v=J3-MZbltzaU> – consulté le 7 octobre 2018

Le système limbique, illustré par la figure 20, nous concerne dans la recherche de liens entre données physiologiques et ressenti émotionnel. Anatomiquement, il est un regroupement de parties de l'encéphale. Ses principales composantes sont :

- L'hippocampe, qui joue un rôle dans l'apprentissage et le stockage de l'information (mémoire à long terme, consolidation).
- L'amygdale, qui joue un rôle dans la peur, l'anxiété, la colère, l'agressivité et aussi la mémoire émotionnelle.
- Le fornix constitué de fibres nerveuses qui permet de relier les deux hémisphères cérébraux et plus exactement l'hippocampe aux corps mamillaires. C'est la principale voie efférente de l'hippocampe et la voie afférente du cortex entorhinal et l'hippocampe. Il intervient dans la mémoire épisodique.
- Le cortex limbique avec le gyrus cingulaire, cingulum, insula et gyrus parahippocampique, qui joue un rôle de contrôle conscient du comportement.
- Le septum, membrane qui sépare les ventricules cérébraux remplis de liquide céphalorachidien.
- L'hypothalamus, situé sous le thalamus, qui fournit des neurones qui contrôlent à la fois la sécrétion de certaines hormones (hypophyse), le SNA et certains comportements (sexuels, stress ...).
- Les corps mamillaires, qui sont des relais transmettant des impulsions de l'amygdale à l'hippocampe jusqu'au thalamus. Ils jouent un rôle dans les souvenirs épisodiques liés à des émotions fortes et également dans les mémoires spatiales (localisation d'un lieu, d'un objet).
- Les noyaux antérieurs du thalamus, qui reçoivent des connexions des corps mamillaires et du fornix et projettent leurs fibres dans le corps cingulaire, jouent un rôle important dans les systèmes sensoriels.

Plusieurs faisceaux connectent le septum et les corps mamillaires avec l'amygdale et l'hippocampe.

L'anatomie nous donne une description de tout ou partie du corps étudié. Pour comprendre son fonctionnement, il faut se tourner vers la physiologie.

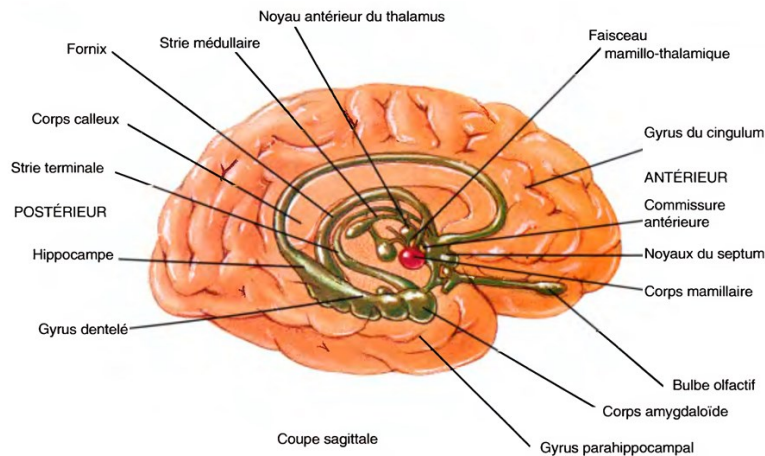


Figure 20 : Le système limbique

<http://amar-constantine.e-monsite.com/pages/anatomie-physiologie/systeme-nerveux.html> -

consulté le 7 octobre 2018

1.3.2.2. Physiologie

Le SNC est composé de deux types de tissus : la substance blanche qui contient surtout les axones des nerfs myélinisés et oligodendrocytes et, la matière grise qui contient les corps cellulaires des neurones. L'espace entre les corps cellulaires contenant des extensions neuronales et des cellules gliales est dit « neuropil ». Les réseaux de neurones supportent les fonctions cognitives dont les émotions. Les cellules nerveuses constituent les unités fonctionnelles principales du système nerveux. Ce sont les neurones. Ils transmettent l'information en utilisant des impulsions électriques (voir schéma ci-dessous). Il en existe de plusieurs sortes. La plupart conduit les impulsions dans une direction mais certains peuvent envoyer des messages vers plusieurs autres neurones. Un neurone est constitué de deux types de prolongements : l'axone et les dendrites. Les dendrites reçoivent et conduisent les signaux (influx nerveux) provenant d'autres cellules nerveuses vers le corps cellulaire. L'axone transmet les messages du corps cellulaire vers la synapse. Le message électrique est transformé en message chimique composé de molécules appelées les neurotransmetteurs comme l'acétylcholine, la noradrénaline, la dopamine, les endorphines, la sérotonine... C'est l'arrivée du courant électrique appelé potentiel d'action dans la terminaison présynaptique qui déclenche des phénomènes qui libèrent le neurotransmetteur, le fixent sur les récepteurs postsynaptiques et les activent. De l'autre côté de la synapse, le message chimique va être transformé en message électrique. Ce phénomène est répété de neurone en neurone. La vitesse de transmission est en moyenne de 90 m/s.

LA TRANSMISSION DE L'INFLUX NERVEUX

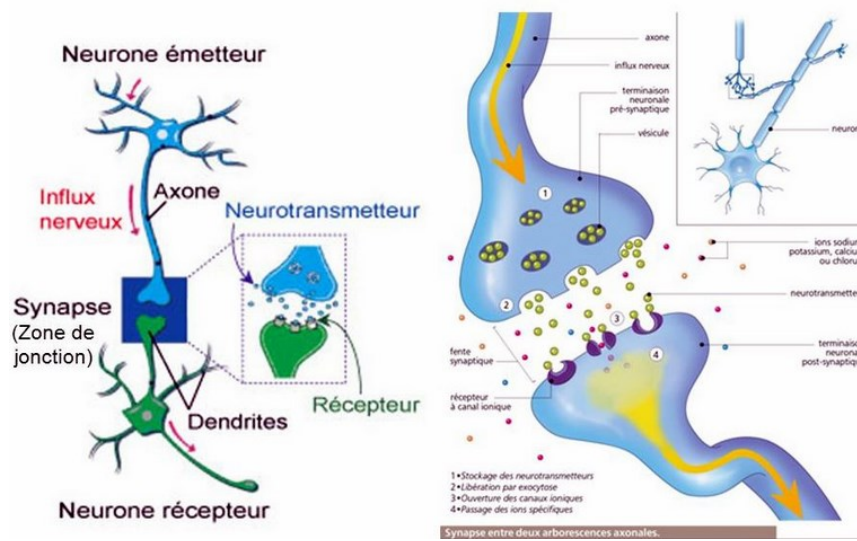


Figure 21 : Transmission de l'influx nerveux

http://www.tda.h.free.fr/fonctionnement_cerveau.php - consulté le 12 octobre 2018

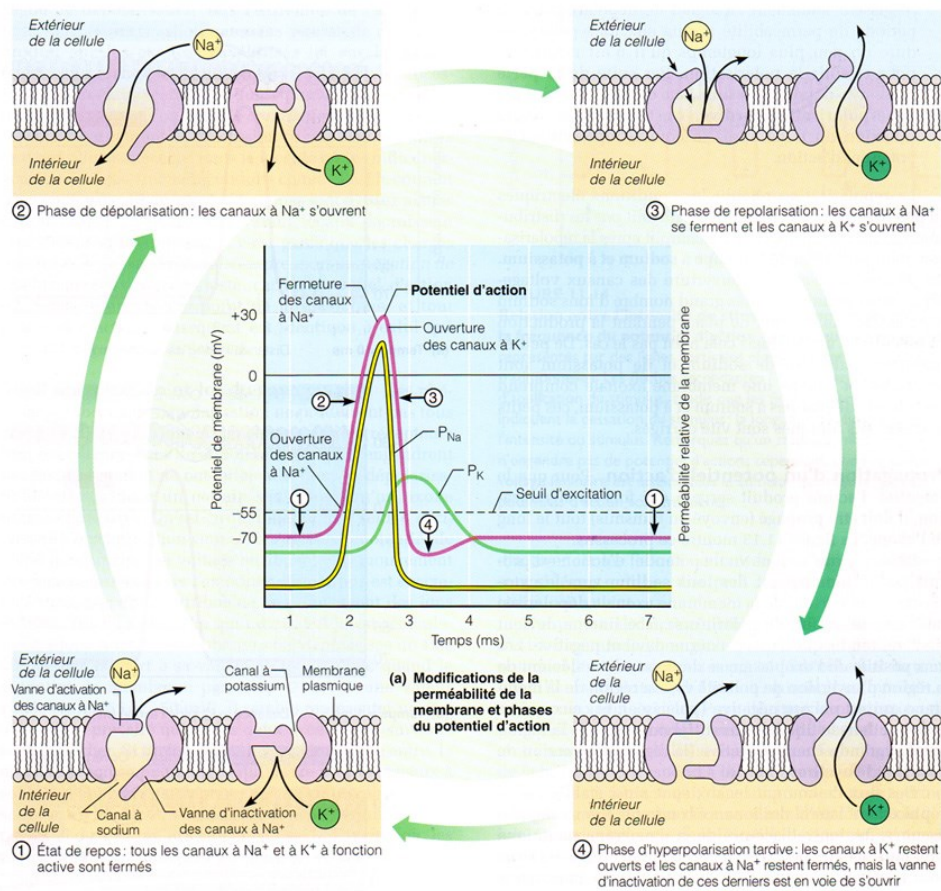


Figure 22 : Le potentiel d'action

<http://www.corpshumain.ca/Neurone.php#img2> - consulté le 12 octobre 2018

Le potentiel d'action (figure ci-dessus) parcourt l'axone. Les changements de potentiels des membranes se produisent localement et à de faibles intensités. Quand la dépolarisation du neurone est suffisante et atteint un seuil, le neurone produit un potentiel électrique fort qui est le potentiel d'action. Le schéma ci-dessus exprime en image ce potentiel d'action montrant l'état de repos en 1, les phases de dépolarisation en 2, de repolarisation en 3 et d'hyperpolarisation en 4 grâce aux ions sodium et potassium.

Le cerveau et son fonctionnement restent la source de nombreux mystères. Néanmoins, il est possible d'observer ce système complexe grâce à des techniques multiples. Certaines activités peuvent être mesurées.

1.3.2.3. Techniques de mesures

Les méthodes sont fondées sur la radiographie (rayons X), le scanner à rayons X complétées de trois autres grandes familles portant sur l'activité électrique, l'activité magnétique et la résonance magnétique.

Les techniques de mesures sont principalement :

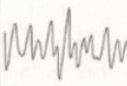
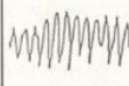
- **L'électroencéphalographie (EEG)** qui mesure les signaux électriques produits par l'activité des neurones. Les oscillations électriques sont appelées électroencéphalogrammes (EEG). L'activité de l'EEG n'est pas reliée à un stimulus sensoriel spécifique. Elle reflète l'activité spontanée du cerveau. L'amplitude des ondes de l'EEG varie entre 10 μ V et 100 μ V. L'état particulier de l'EEG est classé selon la fréquence des ondes électriques présentes.

Les ondes cérébrales sont des signaux induits par des stimulations externes. Ces rythmes sont utilisés pour classifier des patrons de sommeil, pour identifier des patrons d'activité associés à des pathologies ou à des états de conscience et de vigilance. Parmi les rythmes cérébraux on peut identifier des profils de fréquences réparties sur quatre intervalles en hertz, augmentés d'un intervalle axé sur une activité intense :

- **Delta** (0,5 à 4 Hz) est normalement générée en sommeil profond ou lorsque l'on est inconscient.
- **Thêta** (4 à 8 Hz) est l'intervalle entre le sommeil et l'éveil, dans lequel rêves et hallucinations se produisent. Les ondes thêta ont lieu juste un peu avant de s'endormir ou juste avant d'être vraiment réveillé.

- **Alpha** (8 à 13 Hz) est produit lorsqu'on est réveillé et pleinement conscient. Ces ondes sont produites lors d'un effet de relaxation, comme lorsque les yeux sont fermés.
- **Beta** (13 à 30 Hz) correspond à l'éveil, avec l'attention au maximum (lien avec le monde extérieur). Ces ondes sont générées lors d'excitation, de résolution de problèmes ou lors d'exercices de calcul mental.
- Entre 35 et 80 Hz, existent aussi les fréquences **gamma**, liées à l'activité intellectuelle intense comme lors de moments de créativité ou résolution de problèmes logiques ardues.

Le tableau ci-après présente les différentes formes d'ondes associées à leur intervalle de fréquences et à l'activité en mode normal.

DELTA	THETA	ALPHA	BETA	GAMMA
Inférieure à 4Hz	4 à 8 Hz	8 à 13 Hz	13 à 35 Hz	Supérieure à 35Hz
Sommeil profond	Somnolence	Relaxation	Une attention à son maximum	Excitation
				

Source: <http://tpe-battement-binauraux.webnode.fr/quest-ce-que-les-battements-binauraux/>

Tableau 1 : Différentes formes d'ondes cérébrales et fréquences

Le fonctionnement de l'électro-encéphalographie est décrit en image dans le schéma qui suit.

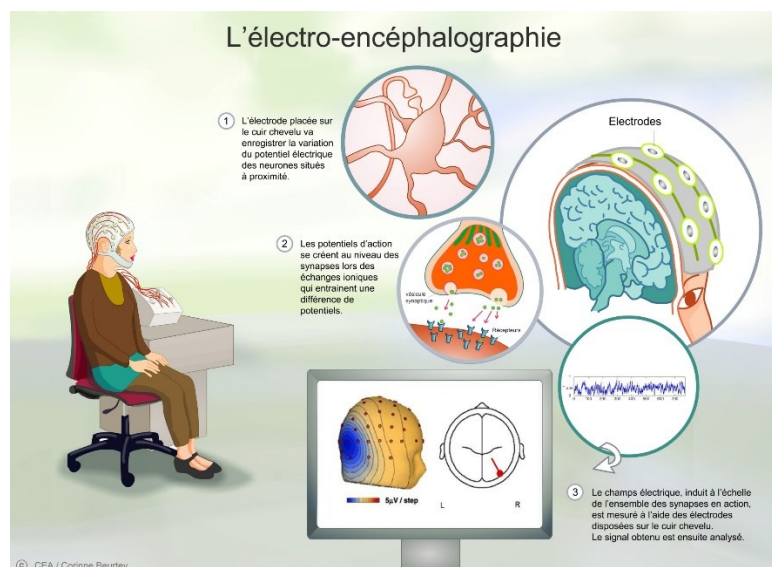


Figure 23 : Electro-encéphalogramme

<http://www.cea.fr/comprendre/PublishingImages/Pages/sante-sciences-du-vivant/essentiel-sur-imagerie-medicale/eeg180413def.jpg> - consulté le 15 septembre 2018

- La **magnétoencéphalographie** (MEG) qui mesure l'activité magnétique du cerveau associée aux courants produits par les neurones. Le schéma ci-dessous exprime le fonctionnement de ce matériel.

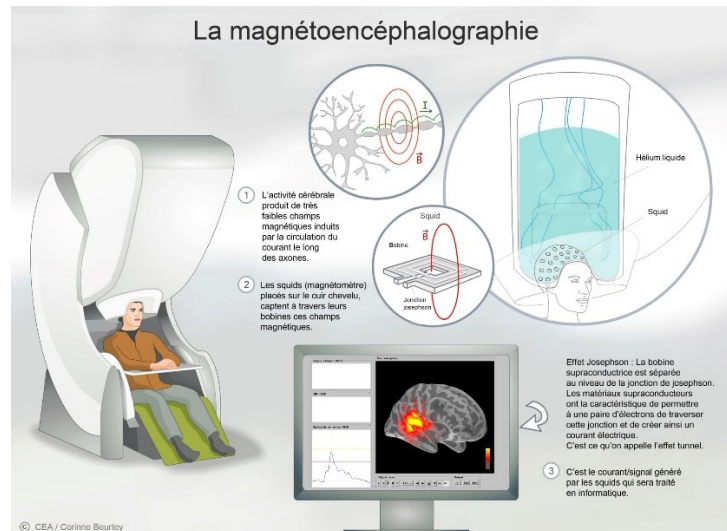


Figure 24 : Magnétoencéphalographie

<http://www.cea.fr/comprendre/PublishingImages/Pages/sante-sciences-du-vivant/essentiel-sur-imagerie-medicale/eeg180413def.jpg> - consulté le 15 septembre 2018

- La **tomographie par émission de positons** ou de photons (TEP) qui permet l'analyse des réactions biochimiques du corps grâce à des traceurs et qui dit traceurs dit injection d'une substance traçable, souvent radioactive. Le schéma ci-après montre comment fonctionne ce matériel.

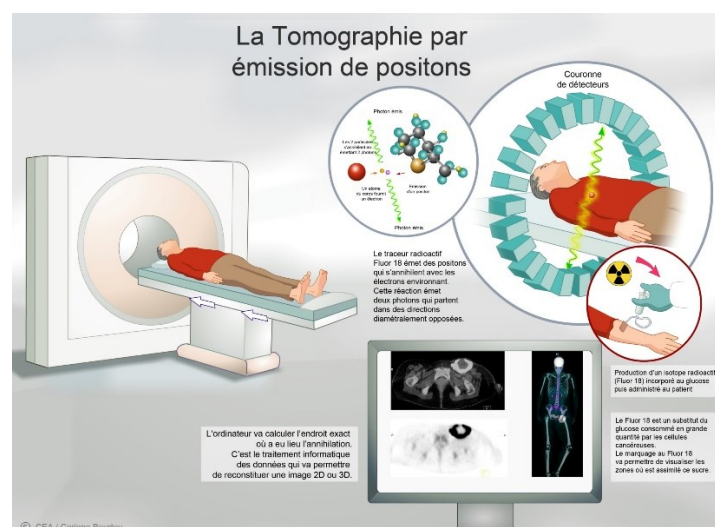


Figure 25 : Tomographie par émission de positons

<http://www.cea.fr/comprendre/PublishingImages/Pages/sante-sciences-du-vivant/essentiel-sur-imagerie-medicale/eeg180413def.jpg> - consulté le 15 septembre 2018

- **L'imagerie par résonance magnétique (IRM)** qui œuvre sur la manière dont se comporte le retour à la position d'origine de l'aimantation des molécules d'eau dans les tissus, notre corps étant composé d'environ 60 % de ces molécules. Le schéma suivant illustre la manière dont fonctionne l'IRM.

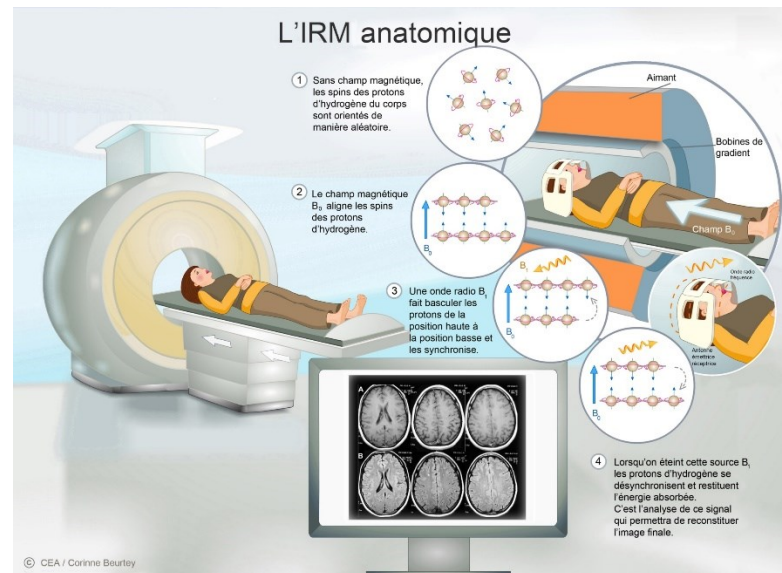


Figure 26 : Imagerie par résonance magnétique

<http://www.cea.fr/comprendre/PublishingImages/Pages/sante-sciences-du-vivant/essentiel-sur-imagerie-medicale/eeg180413def.jpg> - consulté le 15 septembre 2018

L'application de ces techniques traditionnelles de l'IRM a été supplantée par l'application de techniques de contraste liées au sang (à la déoxyhémoglobine) BOLD (Blood Oxygenation Level dependent). L'activité neuronale génère une augmentation locale du métabolisme cérébral et de la consommation de l'oxygène. Ce phénomène est suivi d'une élévation de l'apport en oxyhémoglobine. Il en résulte une hyper-oxygénation qui est détectée par l'IRMf, l'IRM fonctionnelle.

Ces techniques nécessitent du matériel conséquent, sont d'un coût élevé et requièrent de bonnes qualifications. Les données récoltées suivent un protocole médical très précis. Notre étude se place dans un autre contexte. Il est possible de lire des ondes cérébrales grâce à des dispositifs plus légers comme les bonnets comportant moins d'électrodes ou des casques ou bien d'utiliser l'activité électrique et la résonance magnétique. Ces derniers dispositifs sont plus abordables financièrement, moins invasifs et demandent, selon les dispositifs, une technicité plus accessible. Nous avons utilisé ce type de matériel en complément de nos expériences. Un casque (figure 27) comportant deux électrodes constitue un support d'une de nos expériences. Le dispositif à base

d'électromagnétisme (figure 28) manipulé lors des expérimentations sera analysé dans une autre étude. Ces matériels sont présentés en annexe 10 (Plan d'expériences et questionnaires (Chapitre 4)).

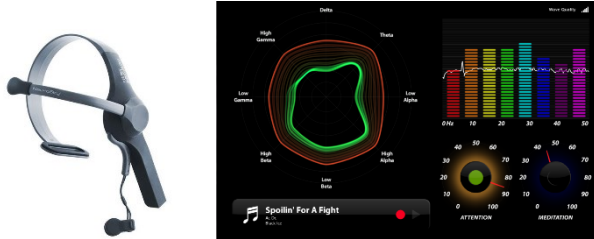


Figure 27 : Casque neurosky

<https://store.neurosky.com>

consulté le 10 février 2016



Figure 28 : Physioscan

https://www.physioscan.fr/bilan_energetique

consulté le 10 février 2016

1.3.3. Le cœur et les relations avec les émotions : anatomie, fonctionnement et techniques de mesures

Le système circulatoire comprend trois systèmes : le cœur, une pompe, le système pulmonaire pour les échanges gazeux et le système sanguin composé des artères, veines, vaisseaux coronaires et portaux. La circulation sanguine est assurée par le cœur et des canaux. Nous allons présenter comment la propulsion du sang par le cœur s'établit vers les poumons, vers le corps engendrant des variations de pression artérielle ou sanguine. Le rythme cardiaque sera abordé par l'autorhythmicité.

1.3.3.1. Anatomie

Le cœur est un muscle creux constitué de quatre cavités ou chambres couplées deux à deux donnant le cœur droit et le cœur gauche avec chacun une oreillette et un ventricule. Le côté droit permet la circulation pulmonaire appelée petite circulation et le côté gauche, la circulation générale appelée grande circulation. Dans la partie supérieure de l'oreillette droite se trouve une partie de tissu cardiaque spécial, capable de conduire l'électricité, appelé nœud sino-auriculaire ou nœud sinusal de Keith et Flack. Cette région commande le mécanisme de régulation des battements cardiaques. C'est le stimulateur cardiaque naturel, chargé de déclencher et établir les battements cardiaques. Cette région commande au cœur d'accélérer lors d'un exercice physique par exemple, et de ralentir lors d'un repos. Le schéma ci-après est une illustration des zones de contrôle des battements cardiaques.

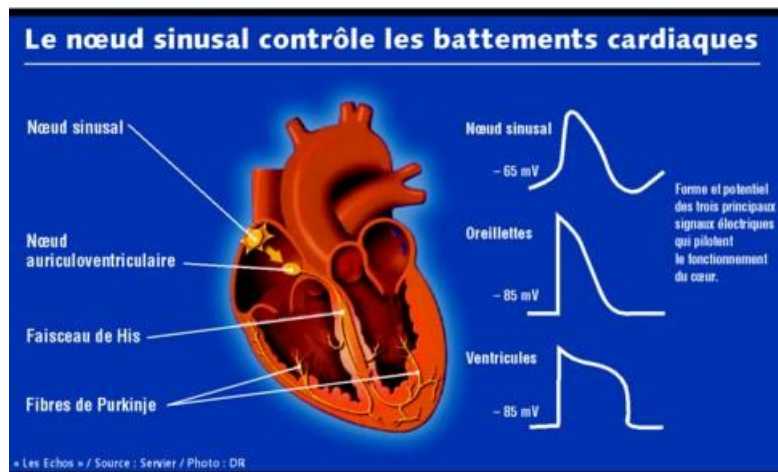


Figure 29 : Zone de contrôle des battements du cœur

https://www.lesechos.fr/02/09/2008/LesEchos/20248-055-ECH_la-frequence-cardiaque-au-coeur-de-la-longevite.htm - consulté le 5 juin 2017

La figure ci-dessous schématise les différentes parties du cœur et montre l'onde associée à un battement sur laquelle nous reviendrons dans les parties consacrées à la physiologie et les techniques de mesures.

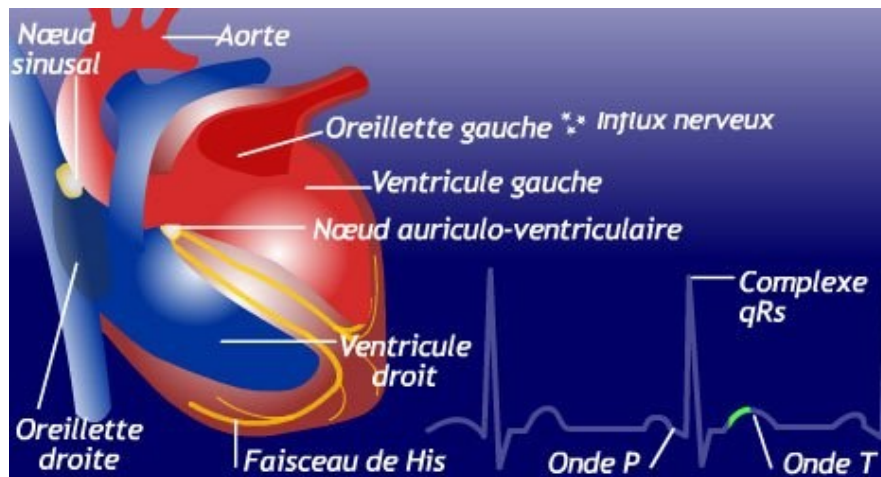


Figure 30 : Différentes parties du cœur et onde relative à un battement

http://www.doctissimo.fr/html/sante/mag_2002/sem02/mag0906/sa_5750_troubles_rythme_cardiaque_appli.htm - consulté le 5 juin 2017

Les veines sont les vaisseaux qui conduisent le sang de la périphérie et des poumons au cœur et les artères emmènent le sang vers la périphérie et les poumons.

Examinons de plus prêt comment fonctionne ce système.

1.3.3.2. Physiologie

Le cœur bat de façon spontanée. Il bat à un certain rythme qui est indépendant du système nerveux. Enfin, ce n'est pas aussi simple et il est à noter qu'il existe une influence du SN que nous verrons plus loin. L'excitation cardiaque est liée à des cellules spécialisées au niveau du nœud sinusal proches de l'entrée des grosses veines au niveau de l'oreillette droite. L'excitation se propage donc à partir des oreillettes puis passe dans les ventricules à travers le nœud auriculoventriculaire (AV) qui forme un pont conducteur entre les oreillettes et les ventricules. La contraction du cœur et la conduction du potentiel d'action passe par une succession de polarisations, dépolarisations et plateaux due à des phénomènes chimiques.

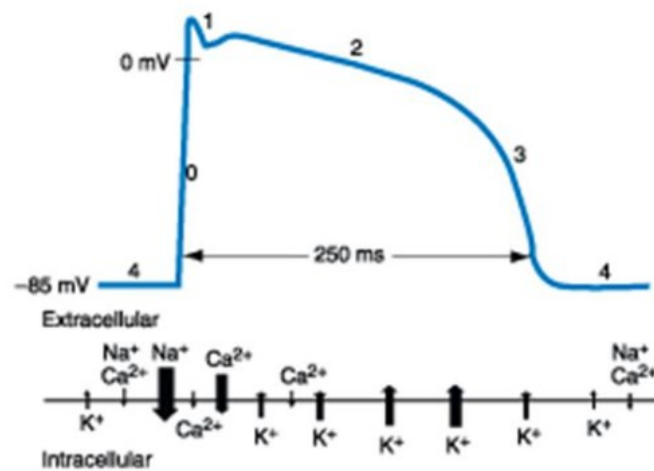


Figure 31 : Schéma du potentiel d'action de la fibre myocardique

<https://slideplayer.fr/slide/3590118/> - consulté le 13 octobre 2018

La courbe ci-dessus illustre la façon dont se propage l'excitation cardiaque. La dépolarisation initiale (phase 0) est due à l'ouverture des canaux de sodium et est rapide avec un dépassement (overshoot). A ce niveau, il y a principalement fonctionnement des oreillettes et des fibres musculaires ventriculaires. Cette phase 0 correspond au complexe QRS (voir Schéma, figure 32, de corrélation entre les mouvements ioniques, le potentiel d'action et l'ECG de surface). Les phases 1 et 2 correspondent à la repolarisation initiale. La repolarisation rapide initiale est due à la fermeture des canaux de sodium. L'inactivation sodique laisse place aux entrées de calcium. Ceci influence le fonctionnement des fibres du nœud sinusal et du nœud auriculoventriculaire. Ces phases 1 et 2 correspondent à la partie ST (voir Schéma, figure 32, de corrélation entre les mouvements ioniques, le potentiel d'action et l'ECG de surface). La phase 3 correspond à la repolarisation finale. Elle est générée par un courant de potassium. La fibre retrouve ses charges de repos. Elle correspond au segment QT (voir Schéma, figure 32, de corrélation entre les

mouvements ioniques, le potentiel d'action et l'ECG de surface). La phase 4 représente l'intervalle entre deux potentiels d'action. Cette phase correspond à l'onde T et le début de QRS (voir Schéma, figure 32, de corrélation entre les mouvements ioniques, le potentiel d'action et l'ECG de surface). De façon schématique, un battement cardiaque peut être superposé au potentiel d'action. Les systèmes sympathique et parasympathique interfèrent directement sur la fréquence cardiaque ainsi que sur la conduction auriculoventriculaire.

Ainsi, l'activité électrique du cœur provoque une réponse mécanique : la contraction du muscle cardiaque, générée, comme nous venons de le voir par de fortes concentrations ioniques réparties sur les membranes cellulaires.

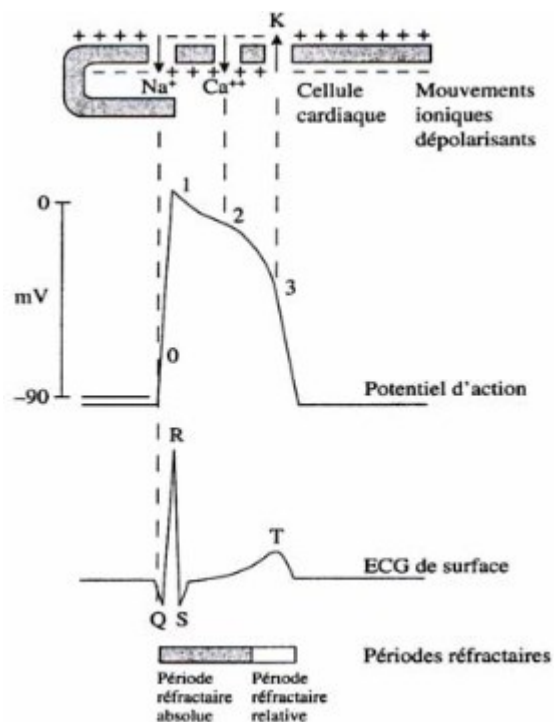


Figure 32 : Schéma de corrélation entre les mouvements ioniques, le potentiel d'action et l'ECG de surface

[abderemane-aliDOC13.pdf](#) – thèse 2013 - consulté le 13 octobre 2018

Le débit cardiaque est le volume de sang pompé par minute depuis le ventricule. Il est le résultat du produit de la fréquence cardiaque (FC) et du volume d'éjection de sang systolique. Comme le débit cardiaque est fonction de la FC et du volume, des modifications sur l'un des deux paramètres engendrent une variation du débit. Une régulation est alors nécessaire puisque, comme nous l'avons déjà vu, le corps cherche l'homéostasie. Cette régulation se fait par les hormones, les nerfs autonomes ainsi que par des mécanismes propres au cœur. Au repos, le débit sanguin est d'environ 5 l/mn, sachant que l'humain dispose d'environ 5 l de sang. A l'effort, il est de 25 l/mn. Il varie bien sûr en fonction du métabolisme. Le rire stabilise le rythme cardiaque, une émotion intense et

brutale impacte directement le cœur et entraîne une augmentation des besoins en sang engendrant un débit plus élevé.

La FC est le nombre de battements du cœur par unité de temps. Elle correspond en général au nombre de battements par minute. La fréquence cardiaque évolue au cours du temps en fonction de l'activité interne ou externe. Elle est d'environ 70 battements par minute chez l'Humain. La FC est au maximum lors de la digestion ou de changement de température par exemple. Elle varie également en fonction de manifestations émotionnelles, de stress. Elle est gérée par le SNA, en particulier le système sympathique qui l'augmente et le système parasympathique qui la freine. C'est ce que l'on nomme l'effet chronotrope. Nous avons vu que les hormones influencent aussi la FC. Les catécholamines, qui proviennent des surrénales, augmentent la FC.

La tension artérielle ou pression artérielle (PA) mesure la force exercée sur les parois des artères par le sang. Ce sont les différentes pressions qui vont régler les actions des valves (voir illustration ci-dessous) qui séparent les différentes cavités du cœur et assurent la bonne circulation du sang. Les quatre grandes valves sont : la valve aortique, la valve pulmonaire, la valve tricuspide et la valve mitrale. Ces valves s'ouvrent pour laisser passer le sang et se ferment pour l'empêcher de revenir en arrière. Ces actions provoquent des changements de pression entre les oreillettes et les ventricules à chaque cycle cardiaque.

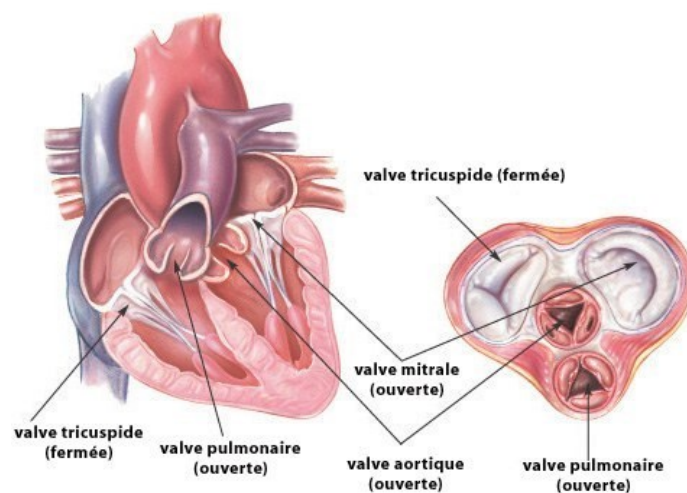


Figure 33 : Valves cardiaques

<https://www.chirurgien-cardiaque.com/chirurgie-des-valves-cardiaque/> - consulté le 14 octobre 2018

Les tableaux 2, 3 et 4³⁰ ci-dessous donnent un aperçu des normes de la FC, de la PA et une classification des PA chez un adulte.

³⁰ <https://www.soins-infirmiers.com/pratique/procedures-de-soins/parametres-vitaux-constantes-recapitulatif#frequence-respiratoire> – consulté le 1^{er} septembre 2018

Normes de la fréquence cardiaque				
Classification	Adulte > 14 ans	Enfant 2 - 12 ans	Nourrisson 1 mois - 2 ans	Nouveau-né < 1 mois
Fréquence normale	60 - 100 bpm	70 - 140 bpm	100 - 160 bpm	120 - 160 bpm
Fréquence accélérée : Tachycardie	> 100 bpm	> 140 bpm	> 160 bpm	> 160 bpm
Fréquence ralentie : Bradycardie	< 60 bpm	< 70 bpm	< 100 bpm	< 120 bpm
bpm : battements par minute				

Tableau 2 : Normes de la fréquence cardiaque

Normes de la pression artérielle				
Classification	Adulte > 14 ans	Enfant 2 - 12 ans	Nourrisson 1 mois - 2 ans	Nouveau-né < 1 mois
Pression normale	140 / 80 mmHg	110 / 60 mmHg	85 / 44 mmHg	75 / 45 mmHg
Pression haute : Hypertension	> 140 / 80 mmHg	> 110 / 60 mmHg	> 85 / 44 mmHg	> 75 / 45 mmHg
Pression basse : Hypotension	< 120 / 80 mmHg	< 100 / 60 mmHg	< 75 / 44 mmHg	< 65 / 45 mmHg
mmHg : millimètres de mercure cmHg : centimètres de mercure				

Tableau 3 : Normes de la pression artérielle

Classification des niveaux de pression artérielle chez l'adulte > 18 ans			
Catégorie	Pression artérielle systolique PAS (en mmHg)		Pression artérielle diastolique PAD (en mmHg)
Pression artérielle optimale	< 120	et	< 80
Pression artérielle normale	120 - 129	et/ou	80 - 84
Pression artérielle normale haute	130 - 139	et/ou	85 - 89
Hypertension grade 1 (légère)	140 - 159	et/ou	90 - 99
Hypertension grade 2 (modérée)	160 - 179	et/ou	100 - 109
Hypertension grade 3 (sévère)	180	et/ou	110
Hypertension systolique isolée	140	et	< 90
Définitions et classification des niveaux de pression artérielle (PA) en millimètres de mercure (mmHg) par la Société Européenne d'Hypertension (European Society of Hypertension (ESH))			

Tableau 4 : Classification des niveaux de pression artérielle

A titre indicatif, les schémas ci-après illustrent la fréquence cardiaque selon que le sujet est au repos ou en activité physique modérée ou intense.

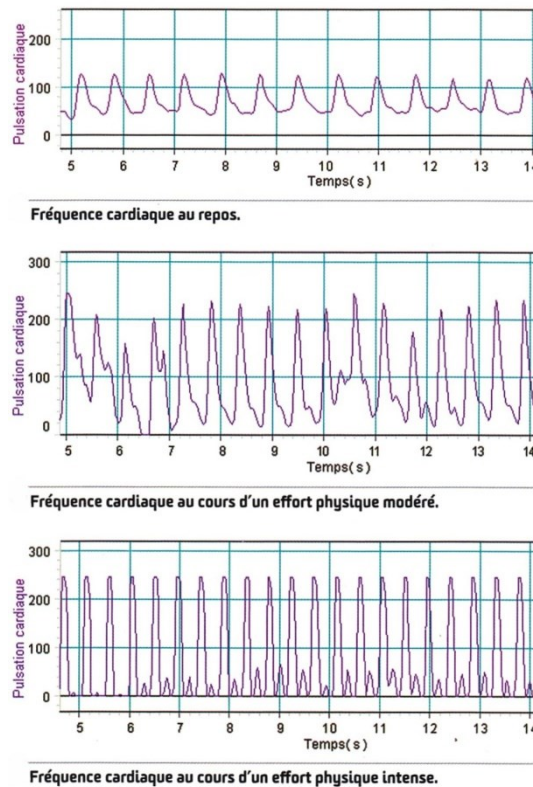


Figure 34 : Fréquences cardiaques au repos ou en activité

1.3.3.3. Techniques de mesures

Dans le milieu médical, le moyen le plus simple pour enregistrer le cœur est l'électrocardiogramme (ECG). Pour être le plus précis, les électrodes doivent être placées directement sur le cœur ce qui signifie que le thorax doit être ouvert. Ceci n'arrive que lors de certaines opérations. Pour enregistrer l'ECG, il est donc procédé à des mesures indirectes à la surface du corps par pose d'électrodes ou dérivations à différents endroits du corps. Il existe deux techniques. On mesure ainsi les différences de voltages entre les points. L'ECG enregistre ainsi l'activité électrique du cœur. Il permet de différencier un fonctionnement normal d'un fonctionnement anormal. La figure ci-dessous montre un tracé normal de l'électrocardiogramme qui comprend une onde classique PQRST.

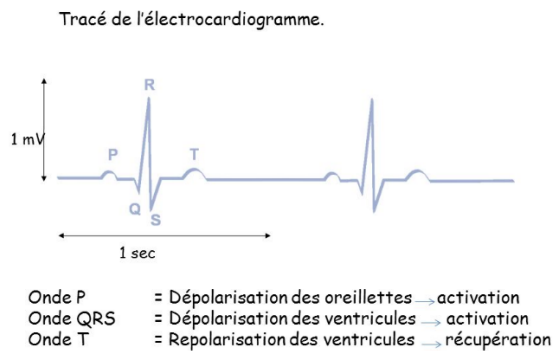


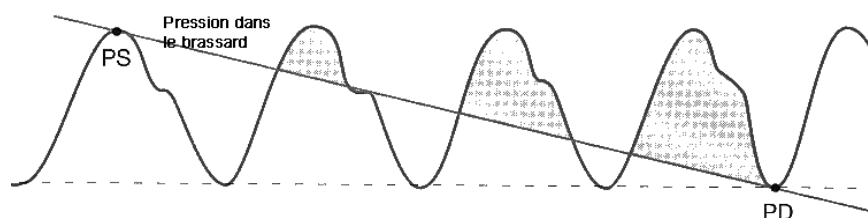
Figure 35 : Tracé d'une onde classique PQRST

<https://slideplayer.fr/slide/10166180/> - consulté le 25 août 2018

Sur le schéma, il n'est pas fait mention de la repolarisation auriculaire. Il s'avère qu'elle est cachée sous le complexe QRS. L'intervalle PR traduit le délai lié à la transmission de l'information à travers le nœud AV.

Le débit sanguin est mesuré dans un cadre médical par différentes méthodes comme les techniques de dilution de traceurs (injection par voie intraveineuse), l'ultrasonographie comme le Doppler et les méthodes fondées sur le principe de Fick (calcul du taux de consommation de substances par un organe, en l'occurrence l'oxygène par le sang).

La pression artérielle peut être mesurée de deux manières : auscultatoire et palpatoire. La méthode auscultatoire consiste en l'utilisation d'un brassard et d'un stéthoscope. Le brassard est muni d'un manomètre qui permet la visualisation de la pression exercée par le brassard (PB). Celui-ci est gonflé jusqu'à l'abolition du pouls (plus de 20 mmHg). On bloque la circulation. Le stéthoscope est placé sur l'artère humérale, on dégonfle progressivement le brassard jusqu'à entendre l'apparition du pouls. C'est la pression systolique (PS). On poursuit le dégonflage jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'obstacle au flux artériel. On obtient ainsi la pression diastolique (PD). On obtient le schéma suivant :



PB > PS : absence de bruits
PB = PS : apparition des bruits
PD < PB < PS : les bruits augmentent d'intensité puis s'atténuent
PB = PD : disparition des bruits

Figure 36 : La pression artérielle en courbe

<http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/ATP/pressio.htm> - consulté le 14 octobre 2018

La méthode palpatoire est similaire à l'autre méthode sinon qu'elle ne donne pas la pression diastolique du fait d'utiliser les doigts et non un stéthoscope.

Il y a plusieurs techniques pour mesurer la fréquence cardiaque ou rythme cardiaque ou bien encore pulsations cardiaques. Certaines régions du corps sont privilégiées comme le thorax, le poignet, le cou, l'aîne et le dessus du pied. Hormis pour la zone du thorax, il peut être appliqué une technique manuelle : la technique des deux doigts avec lesquels on mesure le pouls. Il est aussi utilisé le cardiofréquencemètre qui se place au niveau des différentes zones. Il s'agit d'une technique mécanique, sous forme de ceinture thoracique, de bracelet ou de pince, qui acquiert les battements du cœur à l'aide de capteurs. La pince, souvent appliquée sur un doigt, mesure non seulement les pulsations cardiaques mais également le taux d'oxygène dans le sang. Nous y reviendrons dans la partie sur les poumons.

Le cœur est donc un muscle qui se contracte et bat de façon autonome et régulière en mode normal. Des informations, comme certaines pathologies, des émotions, des changements d'activité, etc viennent l'impacter. Les changements sont alors régulés par le SNA, si possible. Les variations peuvent être observées de différentes manières que nous avons présentées. L'ECG, l'ultrasonographie, les traceurs sont des techniques médicales qui ne sont pas faciles à mettre en œuvre dans notre contexte. Nous avons donc opté pour la fréquence cardiaque à l'aide d'une ceinture thoracique et les matériaux expérimentaux que nous avons élaborés ont pour but de déclencher des variations de fréquence cardiaque.

1.3.4. Les poumons et les relations avec les émotions : anatomie, fonctionnement et techniques de mesures

Le système respiratoire (voir schéma ci-dessous) regroupe plusieurs organes qui permettent d'inspirer et d'expirer l'air afin que les échanges gazeux aient lieu avec le système circulatoire. Les poumons font partie du système respiratoire.

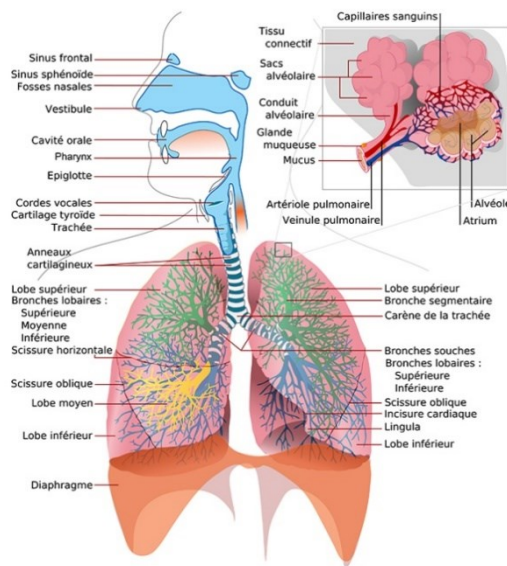


Figure 37 : Le système respiratoire

<http://www.astrosurf.com/luxorion/Bio/sys-respiratoire.jpg> - consulté le 1er septembre 2017

1.3.4.1. Anatomie

Les poumons sont les deux organes de la respiration disposés dans le thorax. La cage thoracique est délimitée par les côtes, les muscles intercostaux et le diaphragme. Elle est tapissée par la plèvre. Les poumons rendent possible les échanges gazeux avec toutes les cellules. Les poumons sont composés des bronches, des bronchioles et des alvéoles. Ils fournissent l'oxygène et éliminent le gaz carbonique via le sang. L'inspiration et l'expiration sont assurées par le système nerveux autonome par le biais des muscles intercostaux et du diaphragme. Les poumons sont ventilés par les mouvements thoraciques (inspiration, expiration) qui correspondent à un cycle respiratoire. Dans une respiration calme, l'air est inspiré par le nez sinon plutôt par la bouche.

La trachée se prolonge par les bronches, une pour chaque poumon. Les bronches se divisent en bronches plus petites que l'on nomme lobes, deux dans le poumon gauche, trois dans le poumon droit. Les bronches se ramifient de deux en deux jusqu'à la vingt-troisième génération. De la quatrième génération à la seizième génération, il s'agit des bronchioles. De la seizième génération à la surface respiratoire, on parle de bronchioles terminales. Celles-ci se divisent pour donner les sacs alvéolaires via des conduits alvéolaires. Les bronchioles respiratoires, les conduits alvéolaires et les alvéoles (300 millions par poumon) constituent les voies de transition et respiratoires et représentent une surface de 80 m² pour les échanges gazeux. Le phénomène des échanges se produit au niveau de la jonction entre alvéoles et capillaires pulmonaires (1000 capillaires) appelée unité alvéolo-capillaire (schémas ci-dessous).

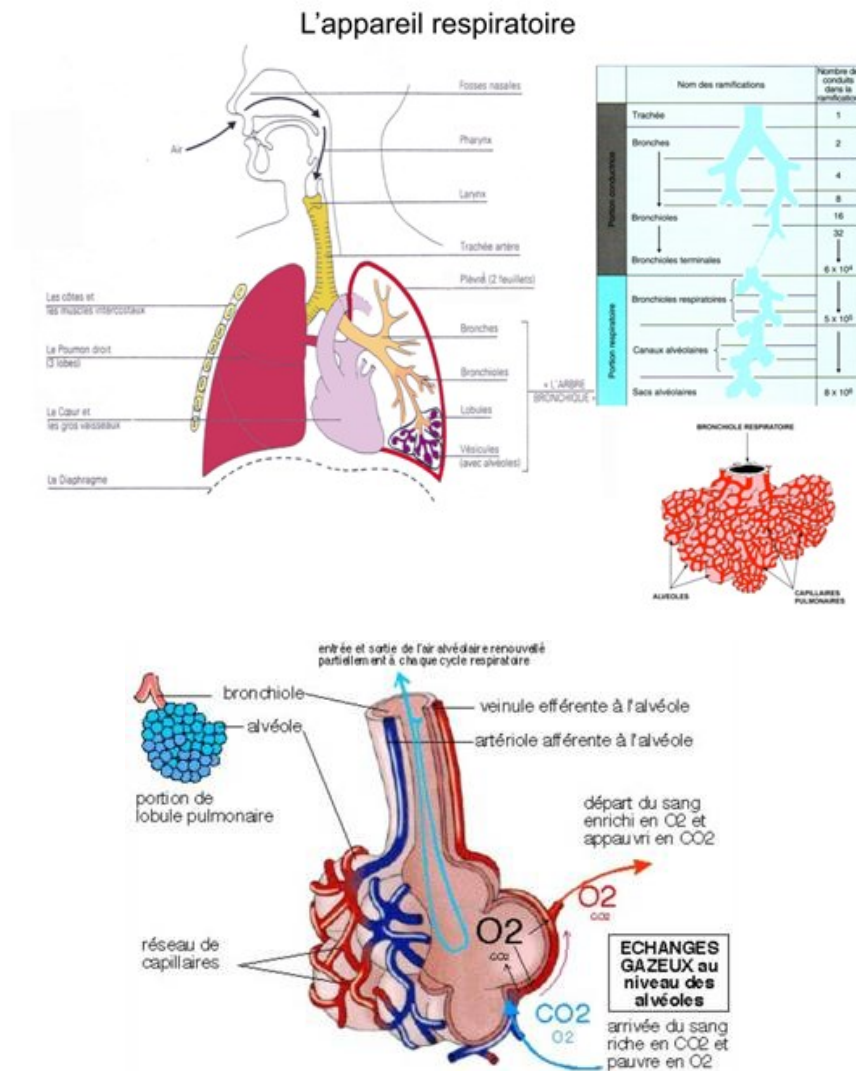


Figure 38 : Appareil respiratoire et échanges gazeux

<https://www.utc.fr/tsibh/public/3abih/10/stage/gromczyk/index.html> - consulté le 1er septembre

2017

1.3.4.2. Physiologie

Les poumons ne sont pas capables de se gonfler seuls. L'action se réalise grâce aux muscles respiratoires que sont le diaphragme et les muscles intercostaux. Interviennent également d'autres muscles dits muscles accessoires pour l'inspiration et les muscles abdominaux pour l'expiration. Ces muscles ne se contractent pas de façon spontanée. Le rythme de la respiration dépend d'influx nerveux. Les muscles lisses des bronches et des bronchioles sont innervés par des fibres parasympathiques qui génèrent la bronchoconstriction. Des nerfs sympathiques innervent les vaisseaux sanguins bronchiques. De ce fait la bronchodilatation ne fonctionne pas comme la

bronchoconstriction. Elle se traduit par une réponse de production d'adrénaline et de noradrénaline. Les poumons disposent aussi de capteurs, des récepteurs sensibles aux étirements, aux irritations ... et aussi des terminaisons qui envoient des informations au SNC. Ces récepteurs jouent un rôle important dans plusieurs réflexes respiratoires.

La respiration est associée aux variations de volume thoracique et au débit ventilatoire (schéma ci-après). A l'inspiration la poitrine se gonfle et l'air pénètre dans les poumons. Lors de l'expiration, le volume de la poitrine diminue et l'air est expulsé. Ce mouvement est appelé ventilation.

La régulation de la respiration dépend de la pression du dioxyde de carbone dans le sang. Toute modification de ce taux engendre un rythme et une ventilation différents. Les variations de l'activité respiratoire peuvent également être dues à d'autres stimulations comme des émotions par exemple.

La fréquence respiratoire est une constante vitale et correspond au nombre de cycles par unité de temps qui est la minute. Elle se mesure par le soulèvement du thorax ou abdomen. Un cycle respiratoire correspondant à une inspiration et une expiration normales et faciles est appelé eupnée.

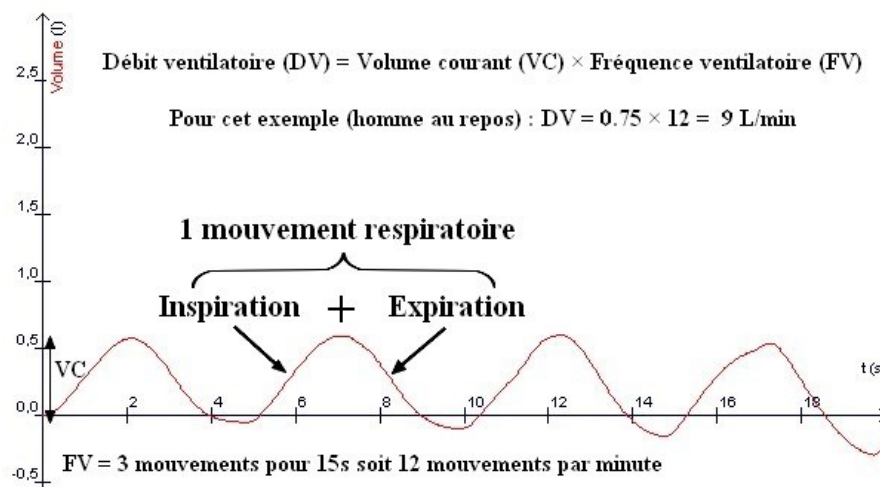


Figure 39 : Respiration et volume thoraciques

http://eric.lacouture.free.fr/lycee/2nde/cours_2_ch6.htm - consulté le 10 septembre 2018

Le tableau suivant montre des normes de fréquence respiratoire.

Normes de la fréquence respiratoire				
Classification	Adulte > 14 ans	Enfant 2 - 12 ans	Nourrisson 1 mois - 2 ans	Nouveau-né < 1 mois
Fréquence normale : Eupnée	12 - 20 cpm	20 - 30 cpm	30 - 60 cpm	40 - 60 cpm
Fréquence accélérée : Tachypnée	> 20 cpm	> 30 cpm	> 60 cpm	> 60 cpm
Fréquence ralentie : Bradypnée	< 12 cpm	< 20 cpm	< 30 cpm	< 40 cpm
Polypnée	Respiration rapide et superficielle, augmentant la ventilation minute			
Hypopnée	Diminution de l'amplitude thoracique			
Hyperpnée	Augmentation de l'amplitude thoracique			
Dyspnée	Gêne, difficulté respiratoire			
Orthopnée	Gêne, difficulté respiratoire au décubitus dorsal complet			
Apnée	Arrêt respiratoire			
cpm : cycles par minute				

Tableau 5 : Normes de la fréquence respiratoire

<https://www.soins-infirmiers.com/pratique/procedures-de-soins/parametres-vitaux-constantes-recapitulatif#frequence-respiratoire> – consulté le 10 septembre 2018

1.3.4.3. Les techniques de mesures

Le volume d'air entrant et sortant des poumons durant la respiration peut être mesuré à l'aide d'un spiromètre. Le schéma ci-dessous présente un spiromètre à cloche. La cloche est libre de se déplacer verticalement selon l'inspiration et l'expiration.

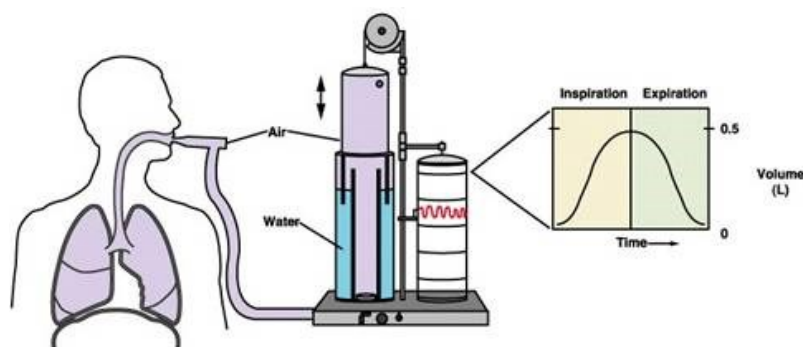


Figure 40 : Spiromètre à cloche

<https://www.utc.fr/tsibh/public/3abih/10/stage/gromczyk/index.html> - consulté le 1er septembre 2018

La trace ci-dessous montre les différents paramètres ventilatoires.

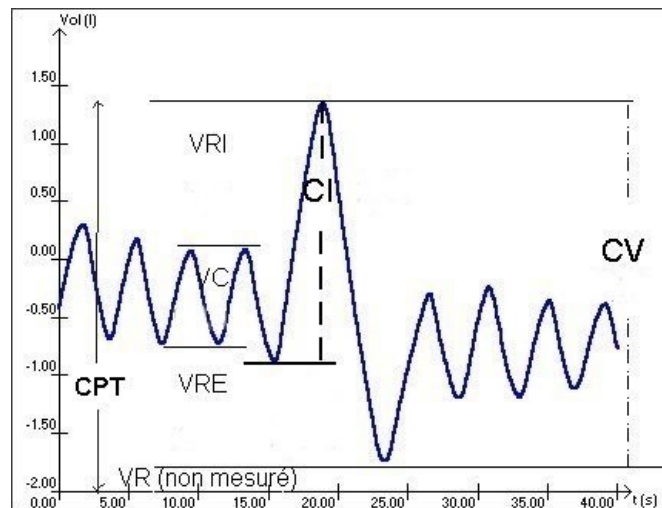


Figure 41 : Courbe des paramètres ventilatoires

<http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/ATP/spiro.htm> - consulté le 10 septembre 2018

où

VRI : volume de réserve inspiratoire ;

VC : volume courant ;

VRE : volume de réserve expiratoire ;

VR : volume résiduel.

CV (capacité vitale) = VRI + VC + VRE

CI (capacité inspiratoire) = VC + VRI

CRF : capacité résiduelle fonctionnelle

CRF = VRE + VR

La pléthysmographie est également un examen médical qui permet d'évaluer la capacité respiratoire en mesurant la capacité pulmonaire, la résistance des bronches. Ce dispositif est aussi employé en cardiologie. Cet examen est plus précis que la spirométrie. Il se déroule en cabine étanche.

Il y a plusieurs techniques de mesures plus simples. La technique d'inspection et palpation qui consiste à placer la main sur le thorax et comptabiliser les cycles respiratoires durant une unité de temps. La technique qui vise à mesurer le volume de la cage thoracique peut être obtenue en utilisant un capteur de déformation. Le pourcentage de déformation permet de calculer les mouvements thoraciques ou abdominaux suivant sa position.

Dans la partie sur le cœur et le système circulatoire, nous avons évoqué le taux d'oxygène dans le sang. C'est l'air inspiré qui procure entre autres l'oxygène. L'oxymètre de pouls (schéma ci-après) ou saturomètre est une pince que l'on place sur le doigt et qui fonctionne à l'aide de LED. Chaque globule rouge a une forme biconcave et est composé en grande partie d'hémoglobine qui lui permet de transporter des molécules d'oxygène. Une fois le globule rouge « chargé » en oxygène, le sang prend une couleur rouge vif. Quand la livraison de l'oxygène est réalisée, le sang devient sombre.

Cette différence colorimétrique est d'une importance capitale pour la compréhension du fonctionnement des appareils de mesure de la saturation.

Un émetteur envoie une lumière infrarouge de longueur d'onde de 950 nm et une lumière rouge de longueur d'onde de 660 nm grâce à deux LED. Ces lumières traversent la peau et sont captées par un récepteur, constitué d'une photodiode, qui les quantifie. La quantité de lumière absorbée va être calculée et donner la saturation en oxygène.

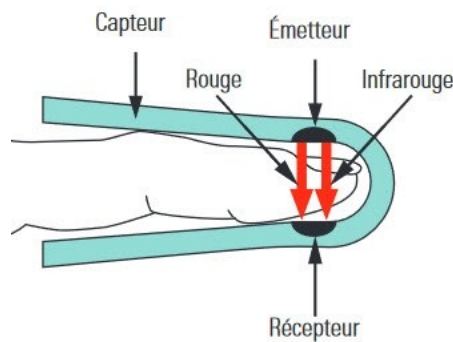


Figure 42 : Fonctionnement d'un oxymètre

<https://www.mediprostore.com/fonctionnement-oxymetre> - consulté le 10 septembre 2018

La respiration est donc source de modulation pouvant provenir de différents événements. Nous avons choisi d'évaluer les mouvements respiratoires en calculant les variations de la circonférence de la cage thoracique grâce à une ceinture placée sous la poitrine. C'est un dispositif facile d'utilisation, abordable en termes de coût, suffisant pour nos expérimentations. Pour plus de détail sur l'utilisation de la ceinture, on pourra consulter l'annexe 10.

1.3.5. La peau et les relations avec les émotions : anatomie, fonctionnement et techniques de mesures pour GSR et T° de surface

La peau ou système tégumentaire est le plus grand organe du corps humain. Elle protège du monde extérieur et constitue notre première défense contre les bactéries, les virus ou autres éléments pathogènes et contre toute agression. Elle est à la fois perméable et imperméable à certaines substances ou organismes. Elle dispose d'un mécanisme de cicatrisation. Elle aide à réguler la température corporelle et à éliminer les déchets par la transpiration.

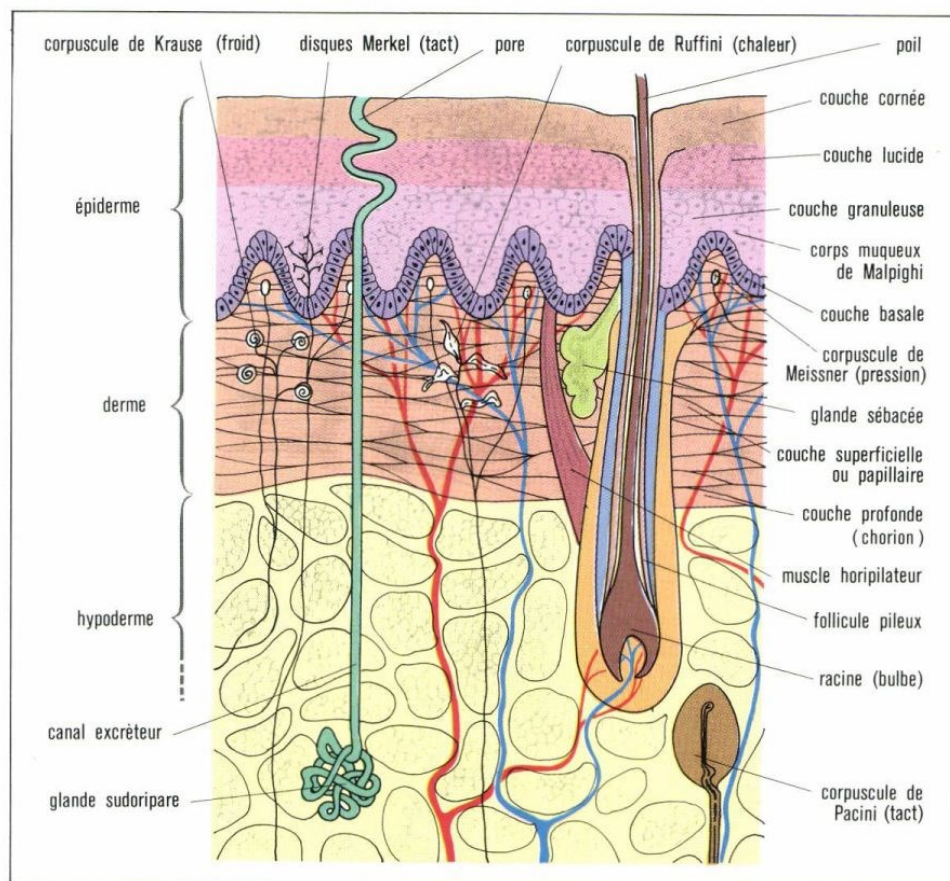
1.3.5.1. Anatomie

La peau est un organe sensoriel jouant des fonctions multiples et complexes comme la protection, l'excrétion, la thermorégulation, des fonctions sensorielles ou encore métaboliques. Elle possède

différents éléments complémentaires tels que l'appareil pilosébacé, les glandes sudoripares et les ongles. Elle est une barrière de prévention par la régulation du flux sanguin, de l'équilibre de l'eau et de la température que l'on constate par la vasodilatation, la vasoconstriction et la production de sueur. La peau est à l'écoute des signaux qui arrivent à son niveau et permet la mesure des changements électriques appelés activité électrodermale.

La peau peut atteindre $2,5\text{ m}^2$ et 5 kg. Ceci est fonction des individus. Elle contient des poils dans des follicules pileux et des glandes sébacées qui lubrifient les poils et la peau. Elle dispose de pores qui évacuent la sueur.

Le schéma suivant propose une coupe de la peau faisant apparaître les différentes couches ainsi que les principaux éléments qui la constituent et que nous présentons dans la suite.



Coupe histologique de la peau.

Figure 43 : Coupe de la peau

Archive Larousse – consulté le 5 juin 2017

La peau est constituée de trois couches :

L'**épiderme** est la couche la plus extérieure. C'est un tissu épithélial de plusieurs strates. Il est non vascularisé et desquame en permanence. Il est surtout composé de cellules de kératine et contient des mélanocytes, des cellules de Langerhans et des cellules de Merkel.

Le **derme**, sous l'épiderme, est un tissu nourricier grâce aux vaisseaux sanguins. Les fibroblastes sont les cellules majoritaires. Des vaisseaux lymphatiques et des nerfs parcourent également le derme.

L'**hypoderme** est la partie la plus profonde et la plus épaisse, sous le derme. Il n'est généralement pas considéré comme faisant partie de la peau. Il est constitué de tissu conjonctif richement vascularisé et plus ou moins pourvu de tissu adipeux.

En ce qui concerne le poil, c'est le muscle arrecteur ou muscle horripilateur contracté par le système nerveux sympathique qui déclenche la « chair de poule ». On ne le trouve pas au niveau des paumes des mains et des plantes des pieds contrairement aux glandes.

Les glandes sudorales ou sudoripares sont de deux types : les glandes apocrines et les glandes eccrines, qui nous intéressent, réparties sur tout le corps et nombreuses au niveau des mains, des pieds et du front. Elles se situent dans le derme. Plus la sueur monte dans les canaux et plus la résistance baisse.

La peau est riche en récepteurs pour la détection de la pression, de la température, de la vibration, du toucher et de la douleur. Les récepteurs présents au niveau de la peau sont les suivants : les corpuscules de Meissner, les corpuscules de Pacini, les corpuscules de Ruffini, les disques de Merkel et les terminaisons libres (figure ci-après).

Chaque récepteur a une modalité spécifique. Les nocicepteurs ou nocirécepteurs se chargent de la sensibilité à la douleur. Les mécanorécepteurs touchent au tactile, à la perception et la pression. Les thermorécepteurs s'occupent de la chaleur. Par exemple, une pression sur la peau est un stimulus qui entraîne une dépolarisation selon l'arc réflexe. Ce sont les corpuscules de Pacini, mécanorécepteurs, qui répondent à la déformation.

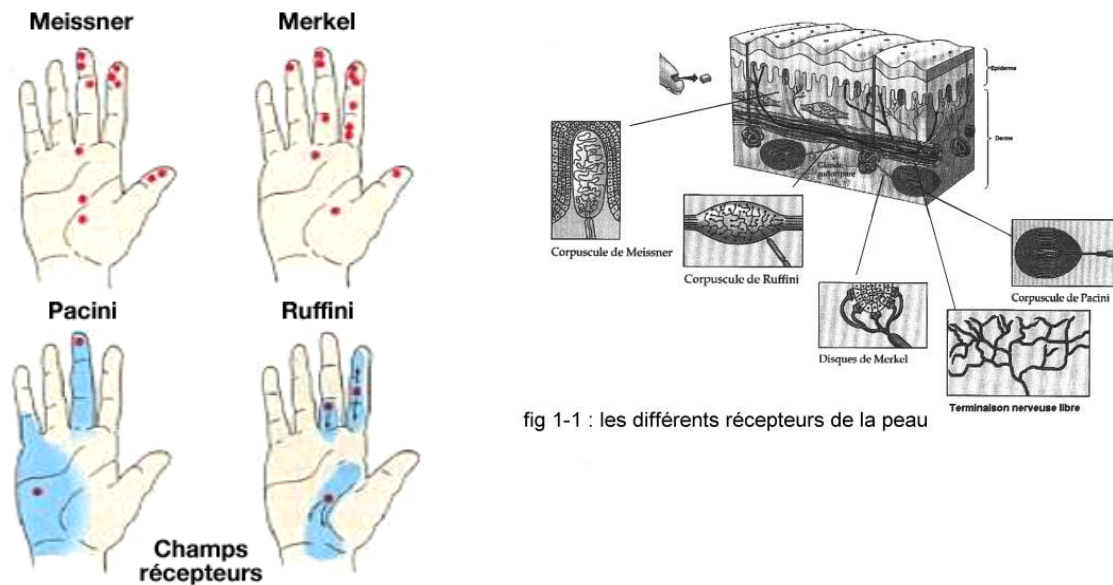


fig 1-1 : les différents récepteurs de la peau

Figure 44 : Récepteurs de la peau

<http://tpepeau.e-monsite.com/pages/le-fonctionnement-de-la-peau.html> (consulté le 22 avril 2017)

Les disques de Merkel comme les corpuscules de Pacini sont des mécanorécepteurs.

1.3.5.2. Physiologie

Comme nous venons de le voir, la peau, qui entoure notre corps, joue un rôle de barrière à double sens. En effet, le corps est un producteur de chaleur et peut aussi subir des variations de température provenant de l'extérieur. La thermorégulation consiste à maintenir une température interne normale ou température de référence (homéothermie) quels que soient son métabolisme et les conditions ambiantes. Il y a quatre modalités d'échange : la radiation (par exemple avec les rayons du soleil), la convection (par exemple lors d'un bain de mer, contact surface cutanée et fluide circulant), la conduction (exemple poser ses pieds sur une bouillotte) et l'évaporation (par exemple lors de la transpiration). Ce phénomène est grandement contrôlé par l'hypothalamus et donc lié à l'activité sympathique. L'humain sans peau meurt. La peau est le reflet de l'état de santé et de l'âge.

Un stimulus, au niveau de la peau, engendre un changement de perméabilité ionique de la terminaison afférente qui engendre lui-même un changement du potentiel de la terminaison nerveuse. Un potentiel d'action apparaît et se propage vers le SNC et est ensuite interprété. Le SNC a besoin de situer le stimulus tout comme sa nature physique et son intensité. Le stimulus peut provenir d'un autre organe comme l'œil ou encore du cerveau. En effet, la perception d'un

objet qu'il soit réel ou imaginaire (pensée) peut aussi déclencher un phénomène de changement de potentiel qui aura comme résultat un effet de sudation. Nous y reviendrons.

La **température** interne varie en fonction du rythme nycthéméral (le sommeil lent entraîne une baisse de température), des hormones (la production de progestérone en période d'ovulation engendre une augmentation de la température), de l'âge (en vieillissant la température corporelle diminue), de l'activité physique (les muscles en fonctionnement libèrent de l'énergie sous forme de chaleur pour une majeure partie et en travail) et **enfin des émotions** (la température peut augmenter de plus de deux degrés lors de stimuli entraînant une stimulation de l'activité orthosympathique). La température de surface ou périphérique est inférieure à la température interne. Ce gradient peut s'inverser. La figure suivante illustre l'impact du chaud et du froid sur les régulations et réponses thermiques.

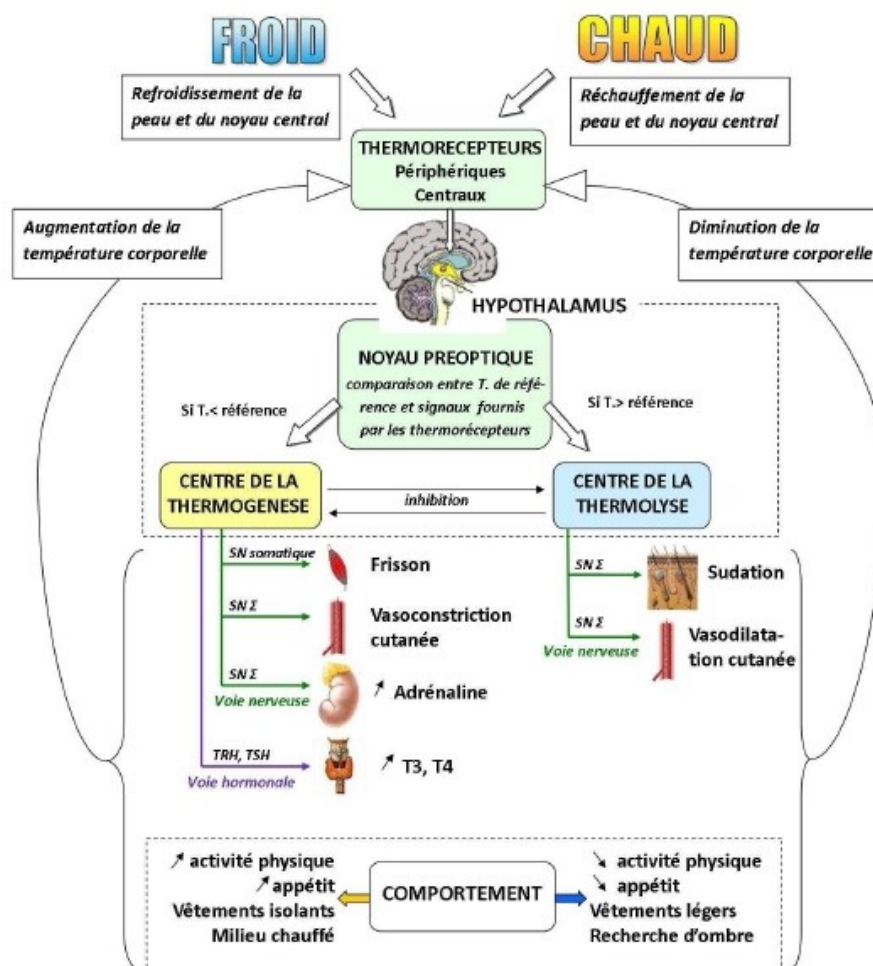


Figure 45 : Représentation de la thermorégulation et des réponses provoquées par une exposition au froid ou à la chaleur

<https://biologiedelapeau.fr/spip.php?article75> – consulté le 5 juin 2017

Les thermorécepteurs sont insensibles aux stimuli mécaniques et chimiques. Une fréquence de décharge constante est maintenue et varie avec un changement de température.

L'activité électrodermale (EDA) a été utilisée en recherche pour analyser les phénomènes de l'attention, les processus de changement de l'information (information processing) et l'émotion afin de détecter ou mettre en corrélation les comportements observés.

Cette activité porte sur les échanges électriques et chimiques de la peau. On retrouve des travaux de Jean-Martin Charcot (1825 – 1893), neurologue et R. Vigouroux (1831 – 1911), médecin, les successeurs de G. Duchenne, sur ces domaines et plus particulièrement sur les techniques électriques, électrostimulations. J.M. Charcot élabore l'électrophysiologie afin de poser des diagnostics et ainsi permet par des réponses aux stimulations galvaniques et faradiques de repérer les nerfs ou faisceaux musculaires atteints. La réponse de la résistance de la peau est l'inverse de la conductance de celle-ci. Elle est liée comme nous l'avons vu précédemment au flux sanguin et de façon plus étroite à l'activité des glandes sudoripares. Elle est le reflet de l'activation sympathique. Même si vous ne sentez ou ne voyez pas la sueur à la surface de votre peau, la conductance électrique peut augmenter très significativement lorsque les pores se remplissent sous l'effet d'un signal envoyé par le SNC, sous l'effet d'une charge de travail, d'une émotion ou bien d'un effort physique. Cette manifestation première a donc lieu sans que vous ne vous en rendiez compte et est mesurable grâce à un capteur adapté.

1.3.5.3. Les techniques de mesures

L'activité peut être mesurée de plusieurs manières : par le potentiel cutané, par la résistance, par la conductance, l'impédance (grandeur en courant alternatif équivalent à la résistance pour les courants continus) et l'admittance (inverse de l'impédance). Le livre de Boucsein (2012) est une référence en la matière. Ces différentes façons de procéder sont toutes des mesures électriques. Les mesures sont réalisées au niveau des mains : doigts et paumes, ou des pieds. La latence communément utilisée est de 1 à 3 s ou de 1 à 4 s. (Fowles et al., 1981)

Le tableau et la courbe intégrés dans le texte correspondent aux caractéristiques des mesures de la conductance et à la représentation de l'activité électrodermale lors d'un stimulus.

Ces éléments sont issus de (Cacioppo, 2007).

Table 7.1. Electrodermal measures, definitions, and typical values		
Measure	Definition	Typical Values
Skin conductance level (SCL)	Tonic level of electrical conductivity of skin	2–20 μS
Change in SCL	Gradual changes in SCL measured at two or more points in time	1–3 μS
Frequency of NS-SCRs	Number of SCRs in absence of identifiable eliciting stimulus	1–3 per min
SCR amplitude	Phasic increase in conductance shortly following stimulus onset	0.1–1.0 μS
SCR latency	Temporal interval between stimulus onset and SCR initiation	1–3 s
SCR rise time	Temporal interval between SCR initiation and SCR peak	1–3 s
SCR half recovery time	Temporal interval between SCR peak and point of 50% recovery of SCR amplitude	2–10 s
SCR habituation (trials to habituation)	Number of stimulus presentations before two or three trials with no response	2–8 stimulus presentations
SCR habituation (slope)	Rate of change of ER-SCR amplitude	0.01–0.5 μS per trial

Key: SCL, skin conductance level; SCR, skin conductance response; NS-SCR, nonspecific skin conductance response.

Tableau 6 : Mesures de la conductance

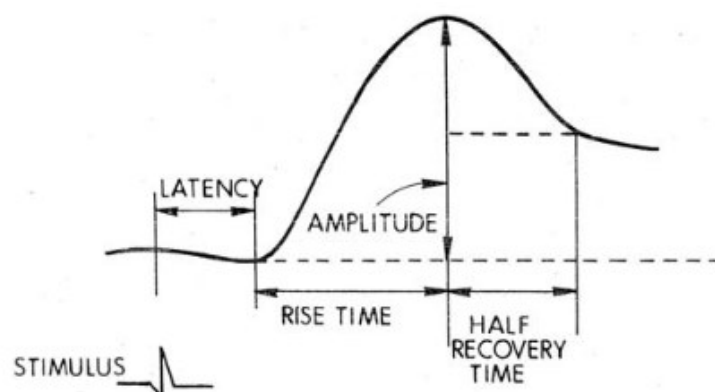


Figure 46 : Courbe de l'activité électrodermal lors d'un stimulus

On constate que les composants principaux de l'EDA sont : le temps de réaction (rise time) : 1 à 3 secondes tout comme la latence et le temps de récupération (half recovery time) : 2 à 10 secondes. Différents aspects peuvent être considérés par rapport aux mesures de l'EDA (Schell et al., 2002) :

- La variance entre individu
- L'habituation à l'expérience
- La succession de stimuli qui peut engendrer un plateau, une réponse complexe à cause de la superposition.

Il y a deux phases dans la conductance : la phase de conductance cutanée tonique (évoluant lentement) et la réponse phasique de la conductance (par pics). Les mesures de conductance cutanée phasique sont en général associées à des événements à court terme et se produisent en présence de stimuli discrets tels que la vision, le son, l'odeur, les processus cognitifs précédant un événement tels que l'anticipation, la prise de décision, etc. qui augmentent brusquement la

conductance de la peau. Ces pics sont généralement appelés réponses de conductance cutanée (RCS). Le schéma suivant illustre une activité phasique.

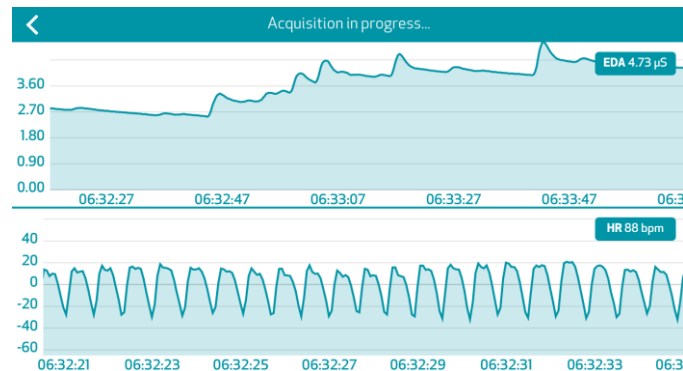


Figure 47 : Activité phasique

<https://support.empatica.com/hc/en-us/articles/203621955-What-should-I-know-to-use-EDA-data-in-my-experiment-> - consulté le 21 octobre 2018

Dans nos expérimentations nous nous sommes servis d'un capteur de conductivité électrodermale muni de deux électrodes et donnant une mesure en μS (micro siemens). Nous avons donc mesuré la résistance électrodermale (RED ou GSR Galvanic Skin Response). Pour plus de détail sur l'utilisation de ce capteur GSR, on pourra consulter l'annexe 10. Le capteur de température de surface est associé à ce capteur.

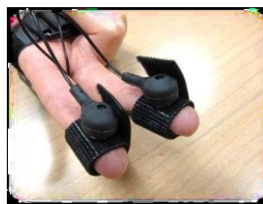


Figure 48 : Capteurs de conductivité électrodermale

Image issue de <http://teaergo.com/> - consulté le 18 mai 2015

1.4. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter un ensemble de définitions, de théories relatives à la compréhension de l'affectivité sous différents angles à la fois spirituel, psychique, psychologique et biologique et ainsi nous situer. Nous avons retenu d'utiliser les termes - états émotionnels dans notre étude et, en particulier, dans l'analyse des données physiologiques, montrant des variations

significatives lors de stimuli spécifiques dans certains contextes, s'illustrant par notre équation $EE = C(\text{var}\phi) \pm \Delta$ et de courte durée, et aussi - émotion lorsqu'il s'agit d'une manifestation instinctive de quelques millisecondes. L'usage d'état sous-entend également les changements d'états avec une représentation potentielle d'états/transitions pour le passage d'un état à un autre comme par exemple passer de la joie à la tristesse par un état neutre.

Nous savons que notre corps recherche l'homéostasie et que, dès qu'il est soumis à des stimuli spécifiques, des modifications internes se font au travers des variables physiologiques. C'est ce que nous mesurons grâce à nos quatre biocapteurs de fréquence cardiaque, fréquence respiratoire, température de surface et résistance électrodermale.

Une de nos hypothèses est de savoir si ces variations peuvent être associées à des états émotionnels et si ceux-ci correspondent à des manifestations reproductibles que l'on peut identifier et nommer. Nous pourrions ainsi obtenir des signatures fréquentielles.

1.5. Bibliographie

- Arnold, M. (1960). *Emotion and personality*. New York: Columbia University Press.
- Balters, S., Steinert, M. (2017). Capturing emotion reactivity through physiology measurement as a foundation for affective engineering in engineering design science and engineering practices. *Journal of Intelligent Manufacturing* 28 (7), 1585-1607. doi: 10.1007/s10845-015-1145-2
- Ballenghein, U., Megalakaki, O., Baccino, T. (2018, juin). Lecture de textes émotionnels : effets sur la compréhension, les mouvements oculaires et la posture du corps. Conference: 2ème Colloque Langage et éMOTions, Université Paul Valéry, Montpellier.
- Bänzinger, T., Grandjean, D., Bernard, P. J., Klasmeyer, G., Scherer, K. R. (2001). Prosodie de l'émotion : étude de l'encodage et du décodage. *Cahier de Linguistique française*, 23, 11-37.
- Betella, A., Verschure, P. F. M. J. (2016). The Affective Slider: A Digital Self-Assessment Scale for the Measurement of Human Emotions. *PLoS ONE*, 11(2): e0148037. doi: 10.1371/journal.pone.0148037
- Beucler, P. (2015). De l'infusion interne à la diffusion pluri-directionnelle... : L'accompagnement de l'AGSAS. *Psychologie et Education*, 4, 57-65.
- Bodin, L. (2013). *La bible des termes médicaux*. Paris: Editions Josette Lyon.
- Boucsein, W. (2012). *Electrodermal activity*, Springer.
- Bradley, M. M., Lang, P. J. (1994). Measuring emotions: the self-assessment manikin and the semantic differential. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry*. 25(1), 49-59. doi : 10.1016/0005-7916(94)90063-9
- Cacioppo, J.T. (2007). *Handbook of psychophysiology* p165, Cambridge University Press, 3 edition
- Chatar-Moumni, N. (2013). L'expression verbale des émotions : présentation. *Langue française*. 180(4), 3-11. doi : 10.3917/lf.180.0003
- Coppin, G., Sander, D. (2010) Théories et concepts contemporains en psychologie de l'émotion. Dans C. Pelachaud (dir.), *Systèmes d'interaction émotionnelle* (p. 25-56). Paris : Hermès Science publications-Lavoisier.
- Cosnier, J. (2015). *Psychologie des émotions et des sentiments*. Paris : Retz.
- Damasio, A. (1995). *L'erreur de Descartes*. Paris: Odile Jacob.
- Damasio, A. (2002). *Le sentiment même de soi*. Paris: Odile Jacob.
- Darwin, C. R. (1872). *The Expression of Emotions in Man and Animals*. London : John Murray.
- Dhorme, P. (1922). L'emploi métaphorique : des noms de parties du corps en hébreu et en akkadien. *Revue Biblique*, 31(4), 489-517.
- Duchesneau, F. (1999). Diderot et la physiologie de la sensibilité. *Dix-huitième siècle*, 31, 195-216.
- Ekman, P., Friesen, W. V., Ancoli, S. (1980). Facial Signs of Emotional Experience. *Journal of Personality and Social Psychology*, 39(6), 1125-1134.

- Ellis, R. (1994). *The Study of Second Language Acquisition*. London: Oxford University Press.
- Fowles, D. C., Christie, M. J., Edelberg, R., Grings, W. W., Lykken, D. T. and Venables, P. H. (1981). Publication Recommendations for Electrodermal Measurements. *Psychophysiology*, 18: 232–239. doi:10.1111/j.1469-8986.1981.tb03024.x
- Frère, J. (2009). *Philosophie des émotions*. Paris : Eyrolles.
- Frijda, N. H. (1986). *The Emotions*. Cambridge : Cambridge University Press.
- Frijda, N. H. (2007). *The laws of emotion*. Mahwah, NJ, US: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Gardner, H. (1983). *Frames of Mind*. New York: Basic Book Inc.
- Gibello, B. (2004) Corps, pensée et représentations de transformation. *Neuropsychiatrie de l'Enfance et de l'Adolescence*, 52(6), 10.1016/j.neurenf.2004.03.015
- Goleman, D. (2003). *L'intelligence émotionnelle*. Paris : J'ai Lu.
- Grandjean, D., Baenziger, T. (2009). Expression vocale des émotions. Dans D. Sander et K. R. Scherer (dir.) *Traité de psychologie des émotions*. Paris : Dunod.
- Grandjean, D., Scherer, K. R. (2009). Théorie de l'évaluation cognitive et dynamique des processus émotionnels. Dans D. Sander et K. R. Scherer (dir.) *Traité de psychologie des émotions*. Paris : Dunod.
- Heise, D. (1979). *Computer-Assisted Analysis of Social Action*. Chapel Hill, NC: Institute for Research in Social Science.
- James, W. (1892). *Psychology (Briefer Course)*. Notre Dame, IN: University of Notre Dame Press.
- James, W. (1903). *Theory of Emotion*. Notre Dame, IN: University of Notre Dame Press.
- Juillet, P. (2000). *Dictionnaire de psychiatrie*. Paris : CILF.
- Kirouac, G. (1989). *Les émotions, monographie de psychologie n°8*. Québec : Presses de l'Université du Québec.
- Kleinginna, P. R., Kleinginna, A. M. (1981). A categorized list of motivation definitions, with a suggestion for a consensual definition. *Motivation and Emotion*, 5(3), 263-291. doi: 0146-7239/81/0900-0263\$03.00/0
- Kövecses, Z. (2000). *Metaphor and Emotion: Language, Culture, and Body in Human Feeling*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Lange, C. G. (1885). *Om Sindsbevaegelser. Et Psyko-fysiologisk Studie*. Kjobenhavn : Jacobs Lunds Forlag.
- Laplanche, J., Pontalis, J.-B. (2009). *Vocabulaire de la psychanalyse*. Paris : Presses Universitaires de France.
- Lazarus, R. S., Averill, J. R., Opton, E. M. Jr. (1970). Toward a cognitive theory of emotions. Dans M. Arnold (dir.) *Feelings and Emotions*. New York: Academic.
- Lazarus, R. S., Folkman, S. (1984). *Stress, Appraisal, and Coping*. New York: Springer Publishing Co Inc.

- Ledoux, J. (1996). *The emotional brain: the mysterious underpinnings of emotional life*. London: Simon & Schuster.
- Lorry, A.-C. (1765) *De melancholia et morbis melancholicis*. Paris : P.-G. Cavelier.
- MacKinnon, N. J. (1994). *Symbolic Interactionism as Affect Control Theory*. New York: State University of New York Press.
- Marmion, J. F. (2018). “L’ordre étrange des choses” Entretien avec Antonio Damasio. *Le Cercle Psy*, 28, 66-69.
- Mehrabian, A. (1971). *Silent Messages*. Belmont, CA: Wadsworth.
- Nugier, A. (2009). Histoire et grands courants de recherche sur les émotions. *Revue électronique de Psychologie Sociale*, 4, 8-14.
- Öhman, A. (1999). Distinguishing unconscious from conscious emotional processes: Methodological considerations and theoretical implications. Dans T. Dalgleish, M. Power (dir.) *Handbook of cognition and emotion*. New York: John Wiley and Sons.
- Osgood, C. E., Suci, G., Tannenbaum, P. (1957). *The Measurement of Meaning*. Champaign, IL : University of Illinois Press.
- Payne, W. L. (1985). *A Study of Emotion: Developing Emotional Intelligence; Self-Integration; Relating to Fear, Pain and Desire*. (Dissertation, The Union for Experimenting Colleges and Universities).
- Pinel, P. (1809). *Traité médico-philosophique sur l’aliénation mentale*, Paris : Brosson.
- Plutchik, R. (1980). *Emotion. A psychoevolutionary synthesis*. New York: Harper & Row.
- Pocock, G., Christopher, D. (2004). *Physiologie humaine – les fondements de la médecine*, Masson.
- Résibois, M., Verduyn, P., Delaveau, P., Rotgé, J.-Y., Kuppens, P., Van Mechelen, I., Fossati, P. (2017). The neural basis of emotions varies over time: different regions go with onset- and offset-bound processes underlying emotion intensity. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 12(8), 1261-1271. doi: 10.1093/scan/nsx051
- Russell, J. A. (1980). A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology*, 39, 1161-1178.
- Salovey, P., Mayer, J. D. (1990). Emotional intelligence. *Imagination, Cognition, and Personality*, 9, 185-211. doi: 0.2190/DUGG-P24E-52WK-6CDG
- Sander, D., Scherer, R. K. (2014). *Traité de psychologie des émotions*, Dunod.
- Schachter, S., & Singer, J. E. (1962). Cognitive, social and physiological determinants of emotional state. *Psychological Review*, 69, 379-99.
- Schell, A., Dawson, M., Nuechterlein, K., Subotnik, K., Ventura, J. (2002). The temporal stability of electrodermal variables over a one-year period in patients with recent-onset schizophrenia and in normal subjects. *Psychophysiology*, 39(2), 124-132.
- Scherer, K. R. (2005). What are emotions? And how can they be measured? *Social Science Information*, 44(4). 695-729. doi: 10.1177/0539018405058216

- Smith-Lovin, L., Heise, D. R. (1988). *Analyzing Social Interaction: Research Advances in Affect Control Theory*. Philadelphia: Gordon and Breach.
- Soussignan, R. (2002). Duchenne Smile, Emotional Experience, and Autonomic Reactivity. A Test of the Facial Feedback Hypothesis. *Emotion*, 2(1), 52-74. doi: 10.1037//1528-3542.2.1.52
- Svec, O. (2013). *Phénoménologie des émotions*. Villeneuve d'Ascq : Editions Septentrion Presses Universitaires.
- Tcherkassof, A. (2008). *Les émotions et leurs expressions*. Grenoble : Presses Universitaires de Grenoble.
- Thorndike, E. L. (1920). Intelligence and its uses. *Harper's Magazine*, 140, 227-235.
- Vidrascu, L. (2007). *Analyse et détection des émotions verbales dans les interactions orales* (Thèse de doctorat). HAL Id: tel-00624085 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00624085>
- Vygotsky, L. (1998). *Théorie des émotions : Etude historico-psychologique*. Paris : L'Harmattan.
- Watzlawick, P., Helmick Beavin, J., Jackson, D. D. (2014). *Une logique de la communication*. Paris : Points.
- Wechsler, D. (1939). *The measurement of adult intelligence*. Baltimore: Williams & Wilkins.
- Wierzbicka, A. (1999). *Emotions Across Languages and Cultures*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Wundt, W. (1904). *Principles of physiological psychology* (5th German edition, Volume 1). (E. B. Titchener, trans.) New York: Macmillan.
- Zuckerman, M. (1990). The Psychophysiology of sensation-seeking. *J Pers* 1990,58: 313-339

1.6. Sitographie

Affect. (s. d.) Dans Wikipédia, l'encyclopédie libre. Repéré le 22 août 2017 à <https://fr.wikipedia.org/wiki/Affect>

Affectivité. (s. d.). Dans carnets2psycho. Repéré le 25 août 2017 à <https://carnets2psycho.net/dico/sens-de-affectivite.html>

Affectivité. (s. d.). Dans Dictionnaire de l'éducation. Repéré le 25 août 2017 à <http://dictionnaire.education/fr/affectivite>

Barbier, J.-M. (2018) Affects émotions, sentiments : quelles différences ? Repéré le 21 mai 2018 à <https://theconversation.com/affects-emotions-sentiments-queelles-differences-92768>

Boquet, D., Piroška, N. Une histoire des émotions incarnées. Repéré le 21 août 2017 à <http://medievales.revues.org/6249>

Corbin, A., Sensibilités histoire des. (s. d.). Dans *Encyclopædia Universalis*, repéré le 21 août 2017 à <http://www.universalis.fr/encyclopedie/histoire-des-sensibilites/>

Cruveilhier, P. (1938). Commentaire du Code D'Hammourabi. Repéré le 21 août 2017 à http://jean-pierre.morenon.pagesperso-orange.fr/curieux/pdf/CH_Trad_de_P_Cruveilhier.pdf

Définition de sentiment. (s. d.) Dans Les Définitions. Repéré le 13 mai 2018 à <http://lesdefinitions.fr/sentiment#ixzz5FP2X70pi>

Emotions. (s. d.) Dans Dictionnaire Littré. Repéré le 22 août 2017 à <https://www.littre.org/definition/%C3%A9motion>

Emotions. (s. d.) Dans Wikipédia, l'encyclopédie libre. Repéré le 22 août 2017 à <https://fr.wiktionary.org/wiki/%C3%A9motion>

Pensée. (s. d.) Dans Encyclopédie de l'Agora. Repéré le 7 mai 2018 à l'Agora <http://agora.qc.ca/dossiers/Pensee>

Perception. (s. d.) Dans Wikipédia, l'encyclopédie libre. Repéré le 21 mai 2018 à <https://fr.wikipedia.org/wiki/Perception>

Prost, F. (2012) La mesure des affections dans l'épicurisme. Repéré le 30 avril 2018 à <https://journals.openedition.org/pallas/2463>

Sentiments. (s. d.). Dans La Psychologie. Repéré le 13 mai 2018 à <http://www.la-psychologie.com/sentiments.htm>

Chapitre 2

Interaction

« Grâce à la science et à la technologie, nous pourrions rencontrer des races étrangères, et des étrangers, ce sera nous » Norman Spinrad

2. DE L'INTERACTION, DES DISPOSITIFS ET DES TECHNOLOGIES 125

2.1.	INTRODUCTION.....	125
2.2.	DE L'INTERACTION, DES DISPOSITIFS ET TECHNOLOGIES : AU PLUS PRES DE L'HUMAIN TOUT EN ETANT DISTANT	126
2.2.1.	<i>Définitions, terminologie, théories</i>	126
2.2.2.	<i>Des dispositifs et technologies</i>	136
2.2.2.1.	Dispositifs et procédés	138
2.2.2.2.	Autres principes : cybernétique, bionique et biométrie.....	154
2.3.	AFFECTIQUE.....	162
2.3.1.	<i>Définition</i>	163
2.3.2.	<i>Les voies de l'informatique affective</i>	163
2.4.	CONCLUSION.....	164
2.5.	BIBLIOGRAPHIE	166
2.6.	SITOGRAPHIE.....	169

2. De l'interaction, des dispositifs et des technologies

2.1. Introduction

Tout commence autour d'un potentiel perdu dont disposent les êtres pour communiquer et que nous souhaitons retrouver à l'aide, en outre, d'un support tel que le jeu vidéo ou pervasif, moyen expérimental d'approche interactive, miroir possible de nos émotions. Il s'agit là, bien entendu, d'une vision très raccourcie de notre cheminement. Le jeu et l'expérience interactive servent de manière assez aisée, car faciles d'accès, à notre environnement pragmatique, d'une part quant à la mesure de variables comme les mesures physiologiques au travers des stimuli-réponses qu'ils procurent, d'autre part, à la validation de nos dispositifs de remplacement, vicariants, distants et, par voie de conséquence, à la mise en place d'un système adaptable. D'un point de vue général, nous, êtres vivants, évoluons dans un univers complexe avec lequel nous communiquons. Une interdépendance, une relation s'instaure entre les êtres, avec les objets et l'environnement générant des interactions. Qui dit interaction dit communication, échanges sous différentes formes réelles, virtuelles.

Dans notre projet, pour communiquer, nous mettons en place un système interactif. Il est composite et comprend des entités multiples : des humains, des objets manipulables, des objets collecteurs ... des objets numériques, physiques ou mixtes, passifs et interactifs. C'est donc une Méta-Interactions Homme-Machine (Roudaut 2006 ; Calvary 2016). Parmi les objets, nous avons des capteurs de contact qui concernent la collation de mesures biologiques. Compte-tenu de notre souhait de ne plus entraver les utilisateurs, on peut se demander si ces capteurs à même la peau peuvent être remplacés par des procédés sans contact ? Si la preuve en est faite, cela signifiera que les dispositifs vicariants relèvent les mêmes données et une partie du pari sera gagnée. Nous disposerons ainsi de données obtenues à distance pour la conception d'événements liés à des états émotionnels ré-injectables dans le jeu l'adaptant à l'utilisateur. C'est bien l'humain qui est au centre de nos préoccupations. Cette adaptation passera bien sûr par l'élaboration d'un game design ajusté tant du point de vue des mécaniques, que des équipements. Nous abordons ce point dans le chapitre sur le jeu.

Ceci étant, comprendre les technologies, les procédés d'interactions, tout comme l'expérience utilisateur vécue au sein d'un système global, nécessitent quelques précisions afin d'éclairer notre contexte et objectif de travail. Après une introduction, ce chapitre s'articule autour de définitions, théories et technologies des interactions, des interfaces puis présente des dispositifs et procédés

ainsi que d'autres principes comme la cybernétique, la bionique ou la biométrie, sans oublier un point en relation avec l'invasivité qui compte énormément dans ce projet, pour se terminer par une conclusion. L'expérience utilisateur constitue notre premier pas vers l'interaction.

2.2. De l'interaction, des dispositifs et technologies : au plus près de l'humain tout en étant distant

2.2.1. Définitions, terminologie, théories

Dans les années 1990, Donald Norman³¹ est le premier à populariser le concept d'eXpérience Utilisateur (UX – User eXperience) qu'il ne faut pas confondre avec l'utilisabilité. Sa définition³² énoncée dans APCI (2013) est la suivante : *« l'expérience utilisateur englobe tous les aspects de l'interaction de l'utilisateur final avec une entreprise, ses services et ses produits. La première exigence d'une expérience utilisateur réussie est de répondre aux besoins exacts d'un client, sans difficulté ni effort. Ensuite vient la simplicité et l'élégance qui donnent naissance à des produits désirables et plaisants dans leur usage. Une authentique expérience utilisateur ne se contente pas d'offrir aux clients ce qu'ils disent vouloir ou de fournir une liste de fonctionnalités. Afin d'atteindre une expérience utilisateur de haut niveau dans les prestations d'une entreprise, il doit y avoir une fusion harmonieuse des compétences de plusieurs disciplines, dont l'ingénierie, le marketing, le design produit, le design graphique ainsi que le design d'interface ».*

L'utilisabilité se différencie de l'UX par l'absence de ressenti de l'utilisateur. Elle est liée tout simplement à la bonne utilisation des interfaces. La norme ISO 9241-11 définit l'utilisabilité ou usabilité comme le *« degré selon lequel un produit peut être utilisé, par des utilisateurs identifiés, pour atteindre des buts définis avec efficacité, efficience et satisfaction, dans un contexte d'utilisation spécifié ».*

Jakob Nielson (1994) apporte cinq critères qui caractérisent l'utilisabilité :

- La faculté d'apprentissage (learnability)

³¹ Donald Norman, né en 1935, est psychologue cognitiviste américain, professeur émérite en sciences cognitives de l'université de Californie à San Diego. Il a introduit la notion d'affordance (actions entre le monde et l'humain) en design i.e. l'a adapté au champ des interactions homme-machine.

³² « User Experience is the way you experience the world, it's the way you experience your life, that's the way you experience the service, or yeah, an app or a computer system — But it's a system that's everything. » - <http://bit.ly/don-norman-ux> - consulté le 23 mars 2019

- La faculté de mémorisation (memorability)
- La minimisation et la prévention des erreurs (errors)
- L'efficacité³³ (efficiency)
- La satisfaction³⁴ d'utilisation (satisfaction)

Les trois premiers critères représentent la facilité d'usage, notion plus large que l'efficacité, qui « mesure l'effort nécessaire pour l'utilisation d'un produit » selon APCI (2013). La satisfaction, l'efficacité et l'efficacité sont trois composantes de l'utilisabilité. Il s'agit donc de la facilité et du plaisir d'utilisation plus que de la performance. L'utilisabilité s'adresse à la qualité de l'interface. Jakob Nielsen parle d'utilité théorique (usefulness) regroupant l'utilité (utility) et l'utilisabilité (usability). Depuis les années 2010, les critères d'utilisabilité ne cessent d'évoluer, de s'enrichir. La définition de l'UX correspond mieux à notre vision car elle introduit le ressenti utilisateur et s'unit à la notion d'émotion. L'UX est partout et donne lieu à l'émergence d'expertises comme l'UX design, le design de service, l'UI design, le design d'interaction ... Par contre, l'approche « sans difficulté » et « sans effort » ne répond pas vraiment aux attentes utilisateur dans notre contexte ni à nos attentes dans le cadre de ce projet. En effet, le joueur, quel qu'il soit, cherche en général un défi. On peut aussi remarquer que, quand aujourd'hui, nous sommes assaillis de propositions publicitaires soi-disant nous correspondant, car nous avons consulté un produit une fois, nous finissons par être agacés. Nous n'avons pas forcément envie d'être enfermé, stéréotypé, classé, cloisonné, formaté ... ou que d'autres s'immiscent dans notre vie. Laissons-nous une forme de liberté, des défis potentiels engendrant la réflexion, la difficulté, l'effort, le libre choix ! Surmonter des épreuves quelles qu'elles soient renvoi des émotions, source de vie. C'est ce que nous incluons. En revanche, la définition de l'UX en termes d'englobant tous les aspects de l'interaction du joueur avec l'environnement alimente notre orientation. Nous transposons cela assez facilement, en particulier dans le jeu pervasif constituant l'espace ludique premier que nous mettons en œuvre.

Les tentatives pour cartographier cette UX sont nombreuses. Celles qui ont retenu notre attention sont représentées par les figures ci-après. L'utilisateur est bien au cœur des représentations. Il s'y trouve le « look and feel », la prise en compte de nombreux paramètres qui contribue à une forme de classification de l'utilisateur pour mieux décider de ce qui est bien ou bon pour lui, surtout pour fixer son attention et le retenir.

³³ « Rapport entre les sources dépensées et la précision, le degré d'achèvement selon lesquels l'utilisateur atteint des objectifs spécifiés » - ISO 9241-11 3.2. Cette norme couvre l'ergonomie des interactions homme-système. C'est l'efficacité de l'efficacité soit l'optimisation des moyens.

³⁴ Correspond au confort et à l'évaluation subjective d'un système par l'utilisateur et les autres personnes affectées par son utilisation

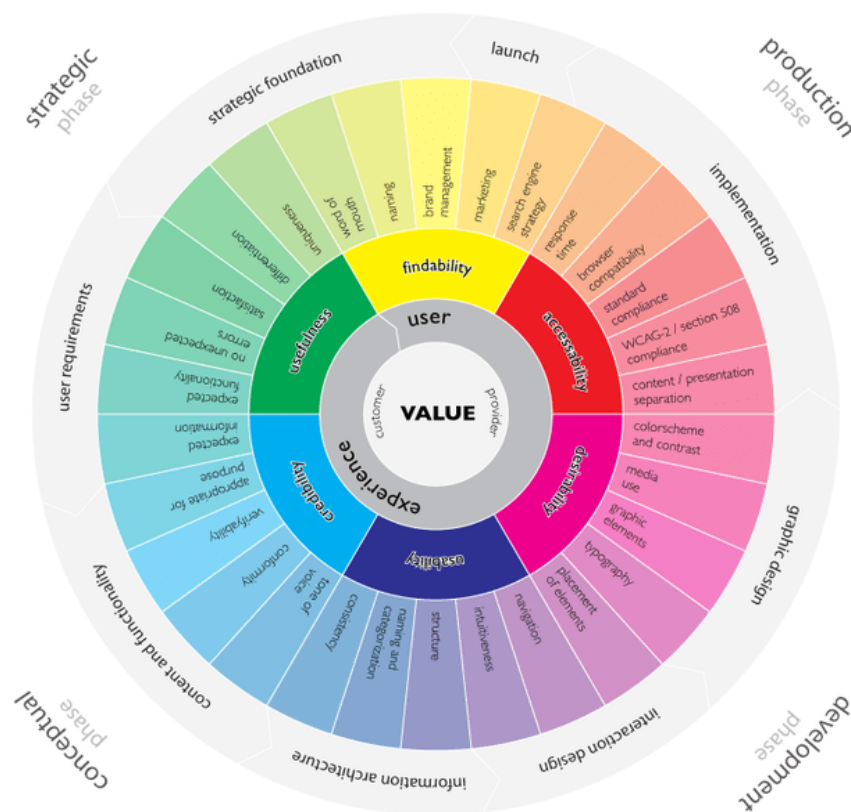
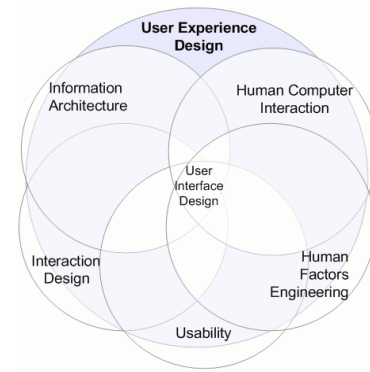


Figure 49 : Cartographies de l'expérience utilisateur

<https://www.benjamin-monnerneau.com/guide-ux/amp/> - consulté le 16 mars 2019

Bien sûr, nous cherchons à satisfaire le joueur, qui plus est, en fonction de son état émotionnel. Le but n'est pourtant pas toujours d'aller dans son sens. Il faut aussi être capable de lui proposer des événements inattendus qu'il sera, peut-être, intéressé de découvrir, de résoudre ... Etre surpris fait partie des quêtes et peut révéler de nouveaux chemins d'appréciation.

Pour ce qui est de la difficulté soumise au joueur, elle a été abordée dans de nombreux travaux de recherche et correspond toujours à un domaine actif. Levieux (2011) dans sa thèse aborde la difficulté comme « l'effort fourni par le joueur pour atteindre ses objectifs ». Chez Ang (2017), il

est traité de l'expérience du joueur (PX – Player eXperience) évoluant en fonction de l'ajustement de la difficulté. Le dosage des paramètres comme les briques de gameplay, les 3C (controls, cameras, characters)³⁵, la boucle de jeu, les défis et difficultés ... s'imposent aux jeux vidéo et/ou pervasifs et/ou ubiquitaires. En ce qui concerne la difficulté, par exemple, un jeu trop difficile va rebuter le joueur, un jeu trop facile va le frustrer (voir concept du flow chapitre 5). La difficulté, comme nous venons de l'évoquer, est un paramètre du jeu parmi d'autres. Ce sont ces paramètres que nous pourrions faire évoluer grâce au ressenti du joueur, à la possibilité de connaître ses états émotionnels.

Il ne faut pas non plus confondre l'UX et l'interface utilisateur (UI – User Interface). Le schéma ci-dessous montre les différences entre les deux. Nous avons exprimé ce qu'est l'UX. L'UI quant à elle s'applique aux dispositifs avec lesquels l'humain peut interagir et qui sont abordés dans les prochains paragraphes.

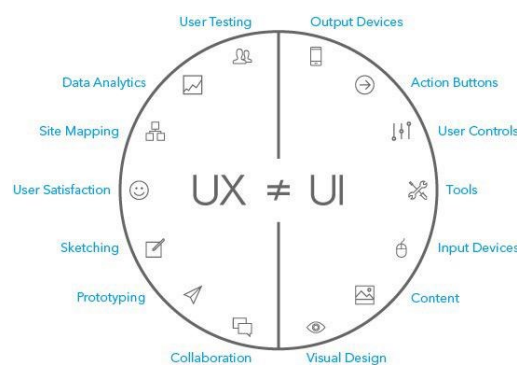


Figure 50 : Différences entre expérience utilisateur et interface utilisateur

<https://blogdummi.fr/dossier/ux-design-comprendre-design-experience-10-images/> - consulté le

16 mars 2019

Nous ne pouvons pas ne pas parler dans ce contexte des facteurs humains (human factors) ou de l'ergonomie qui sont définis comme « une discipline scientifique qui s'intéresse à la compréhension des interactions entre les humains et les éléments d'un système. Elle désigne également la profession qui applique la théorie, les principes, les données et d'autres méthodes de conception afin d'optimiser le bien-être humain et la performance globale d'un système » selon l'International Ergonomics Association³⁶. Les facteurs humains concernent à la fois des caractéristiques cognitives, physiques et sociales. Nous les prendrons en compte le moment venu.

³⁵ Controls = contrôle i.e. interfaces de contrôle par lesquelles on peut agir correspondant au sens du toucher, cameras = caméras correspondant au sens de la vision nous donnent le point de vue, characters = personnages et actions qu'ils réalisent

³⁶ « Ergonomics (or human factors) is the scientific discipline concerned with the understanding of interactions among humans and other elements of a system, and the profession that applies theory, principles, data and

On trouve également la carte de l'empathie qui permet d'exprimer ce que dit, pense, fait et ressent l'utilisateur. « *L'empathy map (carte d'empathie en français) est une synthèse visuelle des propos, pensées, actions et ressentis d'un utilisateur – ou segment d'utilisateurs – d'un produit* »³⁷. La figure ci-dessous est l'illustration de la carte d'empathie par son créateur Dave Gray.

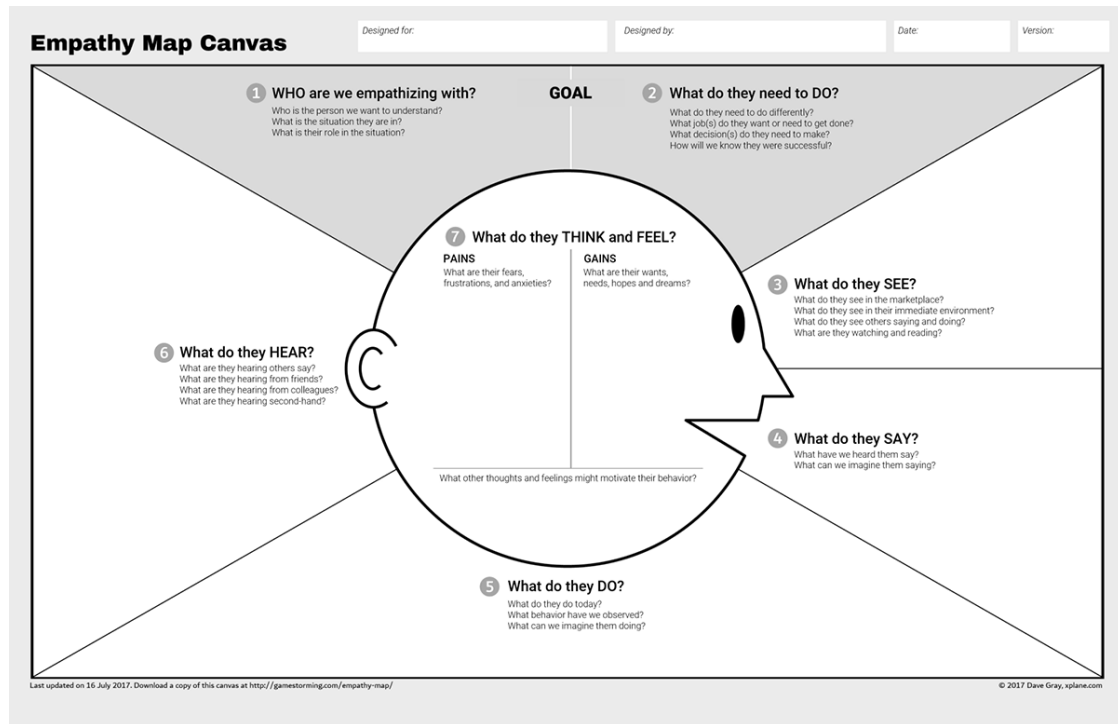


Figure 51: Carte d'empathie créé par Dave Gray (XPLANE)

et développée dans l'ouvrage dont il est co-auteur : Gamestorming

Il y a deux approches selon que l'on prend le point de vue du concepteur ou celui de l'utilisateur. Dans le 1^{er} cas, l'approche est dite techno-centrée car centrée sur la machine. L'utilisateur doit s'adapter à la machine. Dans le 2^{ème} cas, l'approche est dite anthropocentrée car se fonde sur l'humain et ses besoins. La machine doit s'adapter à l'utilisateur. L'adaptation à l'utilisateur est complexe car elle doit prendre en compte de nombreuses caractéristiques qui lui sont liées telles que les différences physiques, le milieu socio-culturel, les connaissances, les expériences, la psychologie (perception, logique, analyse) ... mais aussi relatives au contexte (pour une facilité de prise en main), aux types de tâches (occasionnelles ou pas, sensibles à l'environnement, sensibles au temps ...), aux contraintes techniques (plate-forme, mémoire, bande passante, capteurs ...).

methods to design in order to optimize human well-being and overall system performance »

<https://www.iea.cc/whats/index.html> - consulté le 17 mars 2019

³⁷ <https://www.usabilis.com/empathy-map-carte-d-empathie-quest-dit-pense-ressent-l-utilisateur/> - consulté le 16 mars 2019

L'utilisateur, le joueur est au centre de nos préoccupations, donc anthropocentrées, aussi bien au niveau du confort de prélèvement d'informations physiologiques que dans l'objectif immersif associé aux différents types d'interactions liées aux objets entendu au sens étendu du terme.

L'interaction, activité essentielle pour nous, vient du latin « inter » et de « actio » dérivé du verbe « agere » (agir, faire) soit, entre et faculté d'agir, activité. C'est « *l'action ou l'influence réciproque qui peut s'exercer entre deux ou plusieurs objets, corps, phénomènes ou systèmes physiques. Elle peut en changer le comportement ou la nature* » selon³⁸. On peut relever des termes connexes comme influence, interactionnisme, interdépendance. La définition fait apparaître un mouvement entre les éléments et le changement d'état qui colle à notre système. En effet, comme le précise Berthoz (1997) pour l'humain, le cerveau, à partir des sens, est un simulateur pouvant inventer des hypothèses qu'il reçoit, traite et renvoie vers le monde. Ce mouvement est indispensable à la connaissance de l'environnement et la perception est donc un phénomène dynamique, actif, interactif. Alors, venons-en à l'interaction humain machine (IHM), humain système, système pris au sens large d'environnement d'où humain-environnement.

Il y a peu encore on parlait plutôt d'interaction homme-machine. Pour des raisons que nous connaissons, cela a évolué vers humain-machine. Le terme « homme » est remplacé par « humain ». Néanmoins, dans une grande partie des définitions présentées nous employons la terminologie originelle sauf pour celle plus récente.

L'IHM est, comme le dit Nicolas Roussel³⁹, la science de l'interaction, pas celle des interfaces. Elle couvre à la fois des phénomènes sociotechniques et aussi co-adaptatifs. Elle nécessite une approche pluridisciplinaire. D'où la nécessité de présenter les deux concepts. Beaudoin-Lafon (2016) retrace les 50 ans d'interaction homme-machine.

La définition de l'interaction homme-machine proposée par l'association ACM SIGCHI⁴⁰ est la suivante : « *L'Interaction Homme-Machine est une discipline qui s'occupe de l'évaluation et de l'implémentation des systèmes interactifs informatisés, pour leur utilisation humaine et en étudiant les phénomènes majeurs qui l'entourent* » tiré de APCI (2013). On peut ajouter qu'elle concerne divers domaines d'activités comme l'informatique, l'ergonomie, le design, la psychologie - plus spécifiquement cognitive -, et aussi la sociologie. De base, la communication homme-machine ou homme-environnement se concrétise par un échange entre l'utilisateur et la machine ou l'environnement, au moyen de mécanismes divers d'entrées et de sorties qui doivent être le plus invisibles possibles, le plus naturels. Beaudoin-Lafon (2004) consolide cet aspect. On peut évoquer

³⁸ www.toupie.org/Dictionnaire/Interaction.htm -consulté le 12 mars 2019

³⁹ Directeur du centre de recherche Inria Bordeaux - Sud-Ouest et chercheur en Interaction Homme-Machine

⁴⁰ The first international society for professionals, academics and students who are interested in human-technology and human-computer interaction

ici aussi l'homme réparé, augmenté, amélioré où l'humain recouvre ou découvre certaines capacités. Cela n'est pas nouveau, la jambe de bois du pirate contribuait à sa réparation.

Ces relations, cette interdépendance interviennent de manière conséquente dans tous les systèmes d'information. De nombreux travaux sont réalisés et abordés suivant différents aspects et selon l'angle d'approche du domaine. Ceci donne lieu à une multiplicité de définitions allant de l'Interface Homme-Machine en passant par la Communication Homme-Machine (Caelen, 1996 ; Hoc, 1999), la Coopération Homme-Machine (Hoc, 1998) ou l'Interface Intelligente Homme-Machine (Kolski, 2013 ; Maybury, 1999) :

- L'**Interface Homme-Machine** (IHM) ou HCI (Human Computer Interface) concerne l'ensemble des dispositifs matériels et logiciels qui rendent possible à l'utilisateur d'interagir avec le système.
- L'**Interaction Homme-Machine** (IHM) ou CHI (Computer Human Interaction) ou MMI (Man-Machine Interaction), définie plus haut, est l'ensemble des aspects d'interaction, des phénomènes établissant un lien entre un ou plusieurs utilisateurs et un ou plusieurs systèmes. On cherche à savoir comment les humains se servent des systèmes pour proposer une conception plus adaptée et satisfaisante.
- La **Communication Homme-Machine** (CHM) prend en compte la conception globale d'utilisation, à la fois l'interface et le processus informationnel ainsi que les aspects techniques tels que la modalité. Les capacités de communication de la machine se sont développées au cours du temps sans s'intéresser aux contenus ni aux objectifs et ont donné lieu à cette dénomination (Hoc, 1999). « ..., la CHM ne peut être réduite à un simple échange d'informations, elle doit en fait assurer la coordination entre deux processus intelligents qui se déroulent l'un dans le cerveau de l'utilisateur, l'autre dans la machine, que ce soit pour la coordination de travaux collectifs aussi bien que pour la simulation de tâches ou l'aide coopérative (assistance) » Caelen (1996).
- Le **Dialogue Homme-Machine** (DHM) est défini comme une manière particulière de communiquer. Il existe dans ce cas une dimension relative au langage mais il ne s'agit pas du dialogue naturel propre à l'homme puisqu'il est établi entre l'homme et le matériel.
- La **Coopération Homme-Machine** (CHM) est un concept qui renvoie aux activités coopératives « intelligentes » c'est-à-dire adaptées. Ces activités peuvent améliorer les capacités adaptatives des systèmes Homme-Machine aux différents environnements rencontrés (Hoc, 1998).

- **L'Interface Intelligente Homme-Machine (IIHM)** est un domaine vaste qui se situe à la croisée de plusieurs disciplines comme l'interaction homme-machine, l'intelligence artificielle, l'ergonomie et les sciences cognitives comme l'exprime M. Mayburry :

« Intelligent User Interfaces (IUI) are human-machine interfaces that aim to improve the efficiency, effectiveness, and naturalness of human-computer interaction by representing, reasoning, and acting on models of the user, domain, task, discourse, and media (e.g., graphics, natural language, gesture). IUI are multifaceted, in purpose and nature, and include capabilities for multimedia input analysis, multimedia presentation generation, model-based interfaces, agent-based interfaces, and the use of user, discourse and task models to personalize and enhance interaction. [. . .] » Maybury (1999).

Différentes approches des interfaces utilisateur intelligentes sont également énoncées dans le chapitre 11 de Kolski (2013).

Sans système interactif il n'y a pas d'IHM. Le schéma ci-dessous montre la place de ce système. Il est matérialisé par l'encadré bleu. Ce système prend en compte les entrées de l'utilisateur de manière interactive et lui fournit une représentation perceptible de son état interne associé.

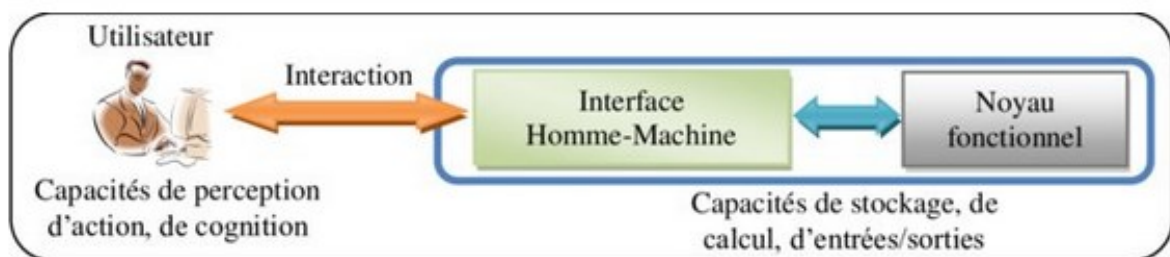


Figure 52 : Schéma de base d'un système interactif

https://www.researchgate.net/publication/299286702_PhD_thesis_conception_et_evaluation_de_systemes_interactifs_pour_la_maintenance_des_systemes_industriels_theorie_et_applications/figures?lo=1&utm_source=google&utm_medium=organic – consulté le 28 mars 2019

Dans un système interactif, il y a la notion de réactivité. Le système doit pouvoir réagir à tout moment, même s'il exécute une autre action. Ce n'est pas facile à faire fonctionner compte tenu que les entrées sorties sont gérées par des algorithmes.

Pour revenir aux multiples définitions, d'autres préfèrent utiliser le terme d'interaction personne-système. Nous utiliserons l'interaction humain-environnement impliquant l'humain et tous les dispositifs que ce soit un ordinateur, une lampe connectée, un cerveau ou une onde. Pour plus de détails sur tous ces aspects, on pourra consulter (Caelen, 2007 ; Cannan, 2011 ; Karray, 2008). Les interactions sont possibles parce qu'il existe une liaison entre au moins deux éléments, dans notre

situation entre l'humain et l'environnement parsemé de dispositifs variés ou entre plusieurs humains, soit directement, soit par des mécanismes ou mécaniques.

Les interfaces, quant à elles, établissent cette liaison de diverses façons. Ces interfaces, les IHM sont prises au pluriel car il existe une grande disparité selon que l'on se tourne vers les utilisateurs, les contextes d'utilisation, les contraintes aussi bien informatiques, économiques que politiques ou bien encore en fonction des domaines d'application comme le web, les jeux, le calcul scientifique, l'informatique médicale, les systèmes de contrôle, de commande... Elles sont en évolution permanente. Une interface est donc un ensemble de dispositifs matériels, logiciels, physiques ou non, d'ondes, permettant à l'utilisateur d'interagir avec un système interactif selon un ensemble d'actions rendant possible cette communication (les interactions).

Nous venons de voir quelques définitions d'interfaces et d'interactions entre les humains, les machines ou les systèmes externes. Nous pouvons compléter par le fait qu'une interface peut également relier directement le cerveau et un dispositif externe, c'est l'interface neuronale directe (IND), encore appelée Interface Cerveau Machine ou Interface Cerveau Ordinateur ou Brain Computer Interface (BCI). Ce domaine est relativement nouveau et provient des avancées récentes dans la discipline des neurosciences avec les évolutions dans le traitement des signaux, l'apprentissage et les technologies de l'information (Rao, 2013). On peut citer aussi les travaux de Clerc (2016) ainsi que de la communauté sur les interfaces cerveau-machine française⁴¹. La communication directe est cependant différente des interactions que nous venons de présenter. En effet, les signaux correspondant à l'activité cérébrale ne nécessitent pas de transformation. Ce sont des signaux électriques directement exploitables. Une IND relie le système nerveux à un ordinateur ou un autre dispositif sans intermédiaire, sans transformation du signal électrique et peut être unidirectionnelle ou bidirectionnelle à ne pas confondre avec les neuroprothèses. En effet, celles-ci, comme les implants cochléaires, se connectent au système nerveux pour fonctionner en interne via la stimulation d'un nerf, dans notre exemple, le nerf auditif. La différence principale entre une IND et une neuroprothèse est le mode de connexion. La neuroprothèse vient stimuler une terminaison nerveuse. L'IND est branchée en direct au système nerveux central. Ici, nous sommes loin des interfaces telles que les souris, les écrans, les dispositifs avec retour de force, les lecteurs d'empreintes, les tablettes ... Quelles qu'elles soient, les interfaces sont des dispositifs d'entrée-sortie positionnés possiblement à différents endroits. Nous parlerons de leur localisation, pour certaines d'entre-elles, en particulier les capteurs, dans la partie sur l'invasivité.

⁴¹ La communauté BCI s'est fédérée en France au travers d'un groupe national de recherche et développement sur les interfaces cerveau-machine aux alentours de 2014 pour aboutir en 2017 à la création d'une association « CORTICO » Collectif pour la Recherche Transdisciplinaire sur les Interfaces Cerveau-Ordinateur. www.cortico.fr

Selon leur utilisation, on peut parler de :

- Multimodalité, lorsqu'il y a combinaison de plusieurs moyens de communication entre l'humain et la machine comme par exemple interactions à deux mains sur une tablette, combinaison de la voix et du geste pour indiquer une instruction ... On pourra se référer à Abdat (2010).
- Réalité virtuelle, lorsque l'environnement est simulé par une machine et qu'il en ressort une expérience d'immersion avec une activité sensorimotrice dans un monde artificiel.
- Réalité augmentée, mixte, diminuée, lorsqu'on superpose dans le monde réel du contenu numérique, qu'on enlève de manière numérique des objets présents ou lorsqu'on conjugue les deux.
- Interfaces tangibles, lorsque la technologie se déporte dans les objets avec lesquels on interagit. « Les interfaces tangibles (en anglais, Tangible User Interfaces ou TUI) désignent des interfaces homme-machine telles que l'utilisateur interagit avec un système numérique au moyen d'objets physiques (Fitzmaurice et al., 1995 ; Holmquist et al., 1999 ; Hornecker & Buur, 2006 ; Ishii, 2008a, 2008b ; Ullmer & Ishii, 2000) »⁴².
- Informatique vestimentaire, lorsqu'on intègre des dispositifs informatiques dans des tissus, bijoux, accessoires divers pouvant être portés par l'humain.
- Informatique mobile, nomade, lorsqu'on dispose d'équipement, d'outils pouvant être itinérants, ambulants.
- Objets intelligents, internet des objets, lorsqu'on dispose d'objets pouvant communiquer du fait qu'ils disposent d'émetteurs et de récepteurs et sont dits « intelligents » de par leur fonctionnement autonome. L'internet des objets est une forme de matérialisation de l'internet dans notre monde réel.
- Environnement pervasif, ubiquitaire, lorsque les objets de l'environnement communiquent avec ou sans action de l'humain. Nous développerons ce point au moment où il sera question d'informatique diffuse de Mark Weiser et dans le chapitre sur le jeu.

Dans notre démarche, nous souhaitons que l'interaction soit la plus naturelle possible, se rapprochant des échanges humain-humain. Rappelons que les « interactions naturelles » se rapportent aux nouvelles modalités d'interactions faisant appel à tous les sens et aussi aux mouvements, qui permettent aux utilisateurs de contrôler des applications non plus via un dispositif d'indirection classique tel qu'une souris, mais par des gestes plus naturels plus intuitifs

⁴² http://oatao.univ-toulouse.fr/18867/1/lepreux_18867.pdf - consulté le 31 mars 2019

avec ou sans contact. En ce sens, nous nous rapprochons de l'Interface Intelligente Homme-Machine (IIHM) sans nous satisfaire complètement car trop restrictive. La dimension de l'environnement n'apparaît pas dans sa définition. De plus, le i pour interface implique un dispositif et est donc limitatif par rapport à l'interaction dans son ensemble telle que nous le souhaitons.

2.2.2. Des dispositifs et technologies

Depuis les années 1945 environ, date des prémisses d'apparition des dispositifs d'entrées-sorties, un long chemin a été parcouru, les évolutions technologiques sont conséquentes et bien réelles. Elles continuent de progresser. Nous sommes passés du perforateur-lecteur de cartes à une informatique nouvelle communicante. Les objets réels s'associent aux objets numériques avec l'informatique tangible. Les dispositifs se portent sur le corps sous forme de vêtements ou d'accessoires. Il s'agit de l'informatique « wearable ». Les objets « intelligents », « ambiants » occupent notre univers réel et virtuel de façon pervasive et/ou ubiquitaire et peuvent circuler d'une zone à une autre par mobilité, nomadisme. C'est la miniaturisation – les micro et nanotechnologies - qui a permis d'accéder à une plus grande mobilité grâce à la diminution de l'encombrement des dispositifs, à leur baisse de consommation, à leur autonomie prolongée. D'ailleurs, certaines caractéristiques utilisées en micro-électronique, comme les effets quantiques (effets tunnel⁴³), n'apparaissent qu'à ce niveau microscopique. Axisa (2005) et Dittmar (1997, 2004, 2007) montrent comment ont évolué les nanosciences et leurs applications dans les domaines comme ceux de la médecine, de la santé. Il y est fait mention de dispositifs portables et ambulants, de capteurs et de vêtements intelligents. La mobilité connectée, encore appelée nomadisme numérique, se développe de plus en plus grâce à ces nouvelles technologies. Les objets communicants interagissent entre eux ou avec l'homme dans un univers dit pervasif (identification et localisation possible directement par l'objet) ou ubiquitaire (informatique intégrée, enfouie, omniprésente dans les objets usuels intelligents du monde réel accessibles aux usagers) voire mobiquitaire (mobile et ubiquitaire). Il est aussi fait référence dans ce cas à l'informatique diffuse. Mark Weiser (1991, 1996) avait fait ce constat de l'informatique omniprésente, de son évolution vers une technologie dite calme ou discrète c'est-à-dire « invisible et partout » ou encore « *qui informe mais ne nécessite pas votre attention* ». Il a également illustré sa vision de l'informatique

⁴³ L'effet tunnel est un phénomène de la physique quantique qui fait qu'un objet quantique franchit une barrière de potentiel alors qu'il ne dispose pas de l'énergie nécessaire à ce franchissement

ubiquitaire au travers d'un scénario reprenant la journée d'une mère de famille portée et aidée dans toutes ses actions, augmentant ses capacités (Weiser, 1991).

Le tableau suivant, issu des travaux de Claverie (2010) et repris dans la thèse de Marty (2015), présente un concentré d'augmentation humaine par la technologie. Il porte sur « *quelques exemples de technologies présentées selon qu'elles sont naturelles ou aidées, gérant ou non une information additionnelle et nécessitant ou non une action en retour* ».

bouclage sensori-moteur	- loupe - aides acoustiques - outils manuels	- jumelles ajustables de vision nocturne - dispositifs haptiques - dispositifs à retour d'effort - exosquelettes	- tablettes RV - réalité augmentée interactive
usage spontané	- lunettes - lampes portées - verres intelligents	- lunettes IR montées sur le casque - lunettes 3D - marqueurs RFID - implants bioniques - VeriChip - motion capture	- HUD - biorobots - cyberwares
	technologie naturelle	électronique passive ou pseudo	électronique d'information additionnelle

Tableau 7 : Quelques technologies d'augmentation humaine

Ces apports technologiques peuvent être triés selon quatre grandes classes : la cognition portant surtout sur l'aide à la décision, le contrôle moteur avec substitution de l'élément défaillant ou l'aide voire le perfectionnement de celui-ci, la perception et sensation portant sur l'amélioration ou la substitution d'une fonction déficiente et enfin une classe combinant tout ou partie des trois autres.

La perception est au centre de toute communication. La définition suivante exprime bien la dimension portée par cette faculté. « La perception est une faculté biophysique ou le phénomène physio-psychologique et culturel qui relie l'action du vivant aux mondes et à l'environnement par l'intermédiaire des sens et des idéologies individuelles ou collectives ».⁴⁴

La communication que nous cherchons à établir dans notre exploration devrait s'affranchir des dispositifs et procédés envahissants même si dans un premier temps ils nous aident à comprendre et nous servent de témoins. Passons en revue quelques-uns d'entre eux en liaison avec certains canaux sensoriels classiques.

⁴⁴<http://fr.wikipedia.org/wiki/Perception> (consulté le 15 mai 2015)

2.2.2.1. Dispositifs et procédés

Les dispositifs en relation avec nos perceptions sont nombreux, nous avons choisi d'examiner certaines technologies liées aux sens comme des lunettes ou casques de réalité augmentée, des oreillettes, des gants avec capteurs (Biet, 2007), ou traitant du goût (Ceto, 2013) et de l'odeur avec les exemples du nez électronique^{45,46}. Cela nous a permis de comprendre leur fonctionnement et en quoi ils pouvaient participer au déclenchement de sensations. Certains de ces équipements en relation avec des canaux sensoriels courants liés aux sens de base servent donc d'interfaces entre le cerveau et l'univers. De manière simplifiée, les sens transmettent au cerveau des informations qui sont interprétées pour construire une représentation mentale de l'environnement. Cela se traduit par une activité électrique mesurable du cerveau. On retrouve un système approchant dans les principes de l'interface cerveau-machine. Ils sont utilisés au moyen de matériels afin de pallier des déficits fonctionnels (cognitifs ou moteur) mais aussi pour jouer, contrôler divers appareils voire communiquer par la pensée.

Nous avons évoqué les canaux sensoriels de base relatifs à l'œil, l'oreille, le nez, la peau et la langue, les cinq sens. Nous ne pouvons pas ne pas mentionner qu'il existe des capteurs supplémentaires dans les muscles, l'oreille interne, les articulations ... mais aussi les sens comme celui du soi, de l'équilibre, de l'espace, du mouvement, de la décision ... Ils sont également à prendre en compte dans les mécanismes de perception. Ceci implique une redéfinition du terme « sens ». Alain Berthoz (1997) écrit : « *Le sens est ainsi restitué comme une direction qui accompagne le sujet vers un but et qui est déterminé par lui* ». Il indique que la classification des sens correspond à des fonctions perceptives. Des capteurs spécifiques où certaines de leurs caractéristiques sont utilisés par chacun des sens, les données recueillies sont ensuite filtrées par le cerveau en fonction des buts à atteindre. Le système est très complexe, les fonctions mises en œuvre ne sont pas localisées dans une seule partie du cerveau ou dans une seule structure. De grands progrès ont été réalisés dans la compréhension des mécanismes mais beaucoup de chemin reste à parcourir. Ceci nous ramène à la perception en tant que phénomène psycho-physiologique et culturel que nous avons déjà énoncé.

Dans le chapitre sur les émotions, nous avons présenté la perception sous l'angle plutôt physiologique, biologique, anatomique. Positionnons-nous maintenant dans le processus de perception d'un point de vue psychologique et fonctionnel, de la psychologie cognitive. Cet aspect est en relation directe avec l'interaction. Tijus (2004) analyse le fonctionnement de la pensée pour

⁴⁵ <https://neosepro.com/features/> - consulté le 6 avril 2019

⁴⁶ <http://www.cea-tech.fr/cea-tech/Pages/a-propos-de-cea-tech/nos-reussites/aryballe-technologies.aspx> - consulté le 6 avril 2019

un meilleur apprentissage sous cet angle. Lieury (2008) explique les bases de ce domaine et nous éclaire sur les grands principes. Quant à Dortier (2014), il nous présente l'histoire, les modèles, les différentes disciplines ainsi que les discussions qui animent les sciences cognitives. Nos récepteurs, nos sens reçoivent, collectent de l'information de l'environnement. Perception et réalité diffèrent parfois comme dans le cas où deux individus peuvent percevoir et agir de manière distincte suite à la perception d'une même information. Quoi qu'il en soit, la perception est un processus complexe qui récupère, sélectionne, organise et interprète. Les réactions, les décisions issues du traitement de l'information dépendent de la qualité et de la justesse de perception. De nombreux facteurs influent sur le processus comme :

- L'individu lui-même. En effet, il perçoit en fonction de ses expériences, ses besoins, ses motivations, sa personnalité, ses attentes, ses valeurs ...
- Le contexte, l'environnement soit physique, social, organisationnel ...
- Les caractéristiques de l'objet telles que le contraste, l'intensité, le mouvement, la taille, la nouveauté ...

De manière simplifiée, l'humain suit un processus général dans le cycle de traitement de l'information qui se découpe lui-même en nombreuses étapes. La modélisation du processus de traitement de l'information chez l'humain se traduit par trois éléments : la perception, la mémoire et le système moteur. Le schéma, ci-dessous, très connu, expose ces éléments avec des temps de traitement.

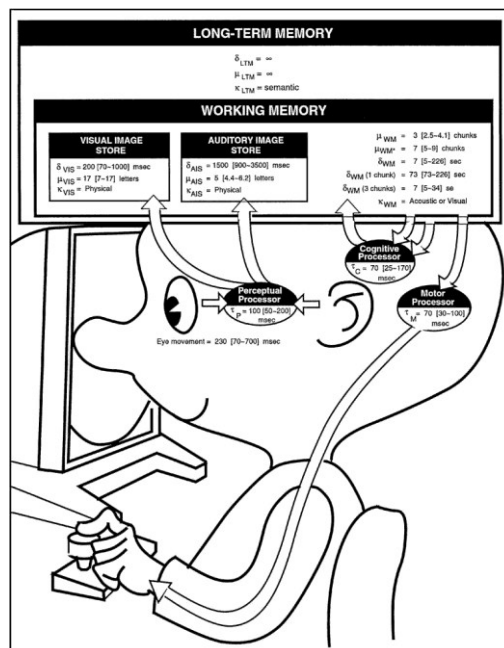


Figure 53 : Processus général du cycle de traitement de l'information

<https://www.slideshare.net/FrdricZugaj/card-moran-newell-the-psychology-of-hci-1983> -

consulté le 28 mars 2019

On peut aussi évoquer le modèle ci-après, résultat du travail de Card (1983) incluant l'attention de Wickens⁴⁷.

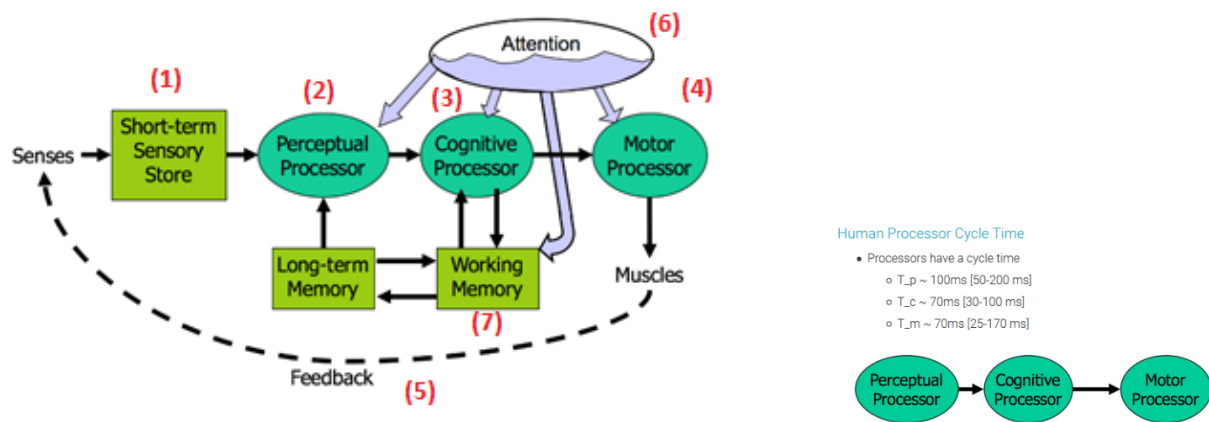


Figure 54 : Traitement de l'information et attention

Schéma augmenté issu de <http://web.mit.edu/6.813/www/sp17/classes/09-more-efficiency/> - consulté le 28 mars 2019

Les différentes étapes se traduisent par le processus simplifié suivant : les stimuli arrivent par les sens et sont stockés dans l'espace sensoriel (1) à court terme. Le processeur perceptuel (2) prend en entrée les informations provenant de (1) afin de tenter de reconnaître les éléments. Il est aidé par la mémoire à long terme qui contient les éléments déjà connus. Le processus cognitif (3) se saisit des éléments reconnus par (2) et réalise des comparaisons et des décisions. Il peut aussi stocker et récupérer des éléments de la mémoire de travail (7). Le fait de penser est le rôle de (3). Le processeur moteur (4) reçoit une action de (3) et demande aux muscles de l'exécuter. C'est ce que l'on appelle la boucle de rétroaction (5). L'attention (6) joue comme un rôle de contrôle. Chaque étape prend un certain temps en fonction du traitement nécessaire dont les mesures moyennes sont indiquées sur le schéma selon le processeur requis.

Dans le chapitre sur les émotions nous avons présenté les différentes techniques de mesures au vu des appareillages exposés, nous n'y revenons pas. Nous examinons à présent des systèmes liés au sens qui sont soit déjà commercialisés parfois en cours d'amélioration ou encore à l'étape de prototypes.

2.2.1.1 La vue

En matière de dispositifs, les lunettes ou casques de réalité augmentée nous apportent un nouveau regard sur notre environnement en y intégrant du virtuel. L'oculus rift développé par l'entreprise

⁴⁷ Wickens, *Engineering Psychology and Human Performance*, Charles E. Merrill Publishing Company, 1984

Oculus VR est un exemple de dispositif de réalité virtuelle utilisé principalement dans les jeux vidéo, et, en particulier, dans le domaine médical, pour le traitement des phobies.



Figure 55 : Oculus

Un kit de développement DK2 est apparu offrant des applications plus réactives, précises et plus immersives. Le problème de cinétose⁴⁹ parfois appelé mal de la réalité virtuelle a été amélioré. Il reste des points à perfectionner comme le champ de vision ou la résolution.

On peut évoquer le projet de Leap Motion North Star qui n'a pas encore vu le jour et prévoit une plate-forme de réalité augmentée open source avec un prototype de casque associé. Il aurait un champ de vision combiné de 100 degrés, une résolution de $1\,600 \times 1\,400$ par œil à 120 images par seconde et une technologie optique de suivi des mains. La société en est à sa troisième version relative à l'amélioration ergonomique du point de vue de la stabilité et la compatibilité avec des lunettes de vue.

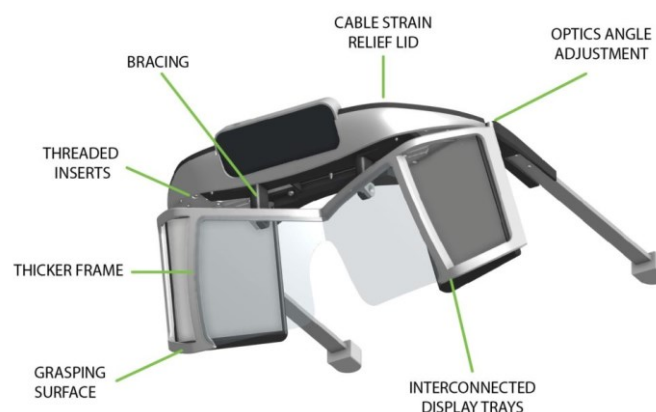


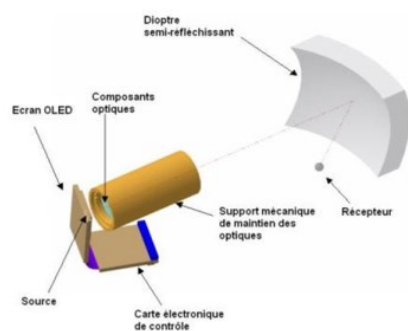
Figure 56 : Casque VR leap motion

<https://casques-vr.com/realite-augmentee-des-nouvelles-du-project-north-star-de-leap-motion-14259/> - consulté le 31 mars 2019

⁴⁸ <http://www.entertherift.fr/images/13-oculus-rift-assis-devant-un-ecran.jpg> (consulté le 15 mai 2015)

⁴⁹ trouble qui apparaît lors d'une discordance entre la perception visuelle et le système vestibulaire

La technique d’affichage appelée « enhancement view » de Laster Technologies permet d’afficher des informations sur un verre transparent. On peut dire que ce sont des Google Glass à la française. *« Le principe de cette technique repose sur la courbure spécifique d’un dioptre semi-réfléchissant qui renvoie l’image d’une source de lumière polychromatique collimatée⁵⁰ dans le champ de vision du porteur »* avance Laster technologies.



51

Figure 57 : Lunettes de Laster Technologies

Cette technologie embarquée sur des lunettes touche différents domaines comme le sport, la médecine... Les expériences montrent qu’il y a un problème d’adaptation des utilisateurs comme avec de nombreuses interfaces jouant avec la perception visuelle. Les repères sont différents, ce qui provoque la cinétose évoquée plus haut.

Le dispositif LightVision est composé d’un système d’eye-tracking et de lunettes de réalité augmentée couplés. Les lunettes projettent des images sur la rétine qui sert d’écran. La pupille commande le système.

Ces appareillages sont en relation directe avec la perception visuelle. Abordons maintenant la perception auditive au cœur des dispositifs ci-après.

2.2.1.2 L’ouïe

En téléphonie, les oreillettes bluetooth ont permis de remplacer les écouteurs filaires. Des micro-oreillettes à induction magnétique moins consommatrices d’énergie, filtrant les bruits parasites et de plus en plus petites, améliorent les interactions de l’utilisateur. Ces dispositifs sont des moyens de communications sans fil discrets. Ils nous intéressent également de par leur utilisation de champ d’induction magnétique.

⁵⁰ Alignée précisément

⁵¹ <http://www.laster.fr/> (consulté le 30 mai 2015)



Figure 58 : Oreillettes bluetooth

Et de plus en plus discrètes, des oreillettes invisibles fonctionnent en bluetooth. L'émetteur bluetooth transmet le son vers la micro oreillette par induction. Elles nécessitent l'utilisation d'un collier amplificateur audio. Ce dispositif est relié au téléphone.

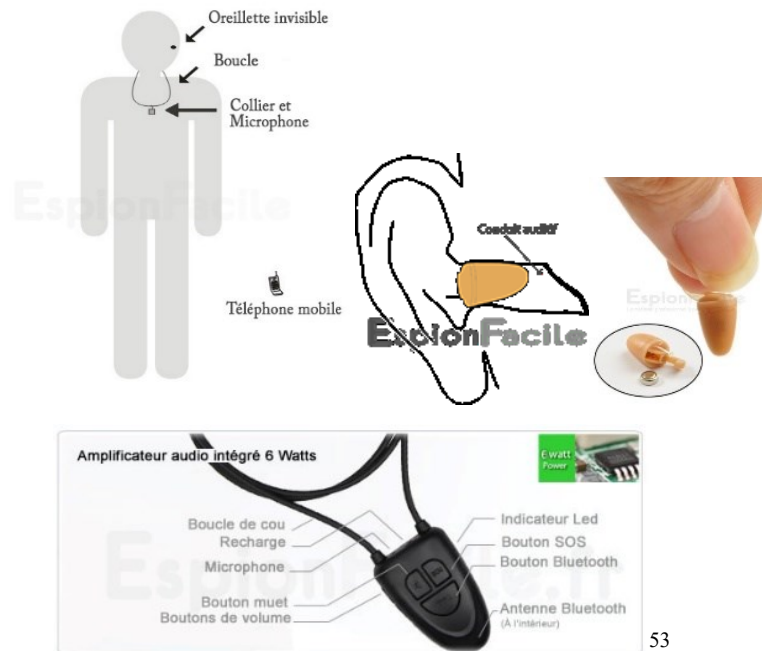
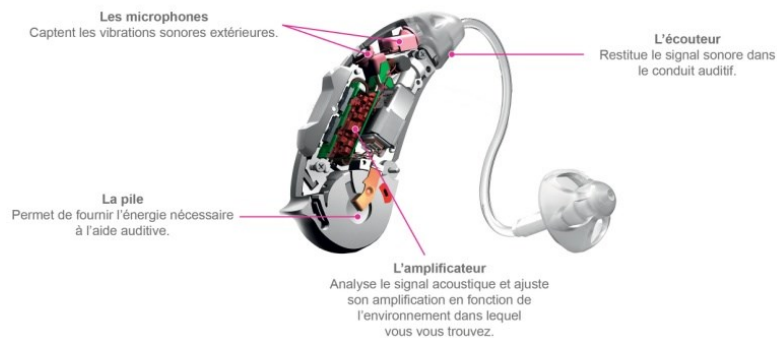


Figure 59 : Oreillettes bluetooth et induction

Les aides auditives ou assistants d'écoute, appareils électroniques embarqués, corrigent la perte d'audition. Elles connaissent une évolution quant à leur dimension et à leur bibliothèque sonore.

⁵² http://www.amc-tec.com/dev/fiche_fr_181_14.html (consulté le 30 mai 2015)

⁵³ <https://www.espionfacile.fr/fr/pack-complet/10-kit-micro-oreillette-bluetooth-invisible-0705632937556.html> - consulté le 31 mars 2019



54

Figure 60 : Modèle d'aide auditive

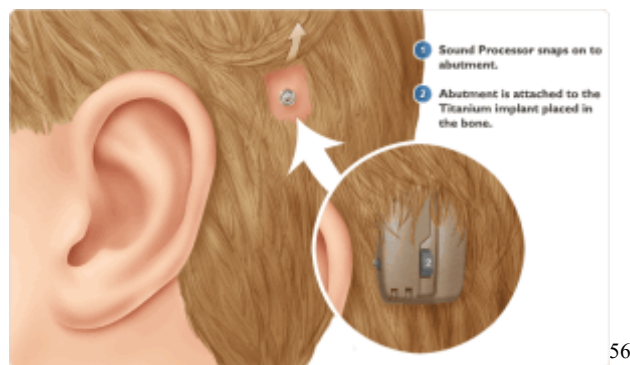
Les technologies ayant évoluées, les aides auditives se sont transformées.



55

Figure 61 : Modèle d'aide auditive miniaturisée

Les procédés vont bien plus loin puisqu'il est possible dans certaines affections de retrouver tout ou partie de l'audition grâce à des implants plus invasifs.



56

Figure 62 : Implant auditif

On trouve des appareils utilisant la conduction osseuse. L'os est l'interface avec l'oreille interne, à savoir la cochlée, et ne passe pas par le canal auditif ni l'oreille moyenne. L'implant est dans le tissu vivant.

⁵⁴ <http://www.webtone.fr/une-aide-auditive-comment-ça-marche> - consulté le 30 mai 2015

⁵⁵ <https://www.capgeris.com/actu-produits-1502/quand-la-prothese-auditive-devient-invisible-une-innovation-signe-oticon-a20235.htm> - consulté le 31 mars 2019

⁵⁶ <http://www.marcbouletaudition.com/article-12978000.html> - consulté le 31 mars 2019

2.2.1.3 Le toucher

Les interfaces liées au toucher, donc dites tactiles, sont peut-être celles qui sont les plus intuitives puisqu'elles correspondent le plus souvent au prolongement de la main ou bien s'apparentent à notre peau comme l'e-skin.

Le professeur Haick et son équipe travaillent sur l'utilisation de nanoparticule d'or sur film polymère pour constituer une peau électronique. Elle permet de mesurer la température, la pression du toucher et l'humidité et pourrait permettre par exemple de remplacer des tissus humains endommagés.



La peau électronique – épaisseur 1 micron – développée par Takao Someya de l'université de Tokyo⁵⁷

Figure 63 : Peau électronique

Le Nokia N900 avec écran tactile à retour de force par électro-vibration donne une illusion de textures. C'est la circulation d'un courant alternatif à la surface de l'écran qui, au contact de l'épiderme, donne une sensation de friction ou de vibration.

Une société finlandaise, Senseg⁵⁸, a développé une technologie similaire où la friction entre le doigt et l'écran reproduit différentes textures : le gazon, la soie ... Pour l'instant une seule sensation est possible à la fois.

Le gant-téléphone pour les personnes malentendantes ou malvoyantes a été conçu à l'université de Berlin. Ce gant est muni de capteurs de pression reproduisant des signaux pour chaque lettre de

⁵⁷ <http://www.astrosurf.com/luxorion/medecine-sans-fil.htm>, p2 - consulté le 17 mai 2015

⁵⁸ <http://senseg.com/> - consulté le 17 mai 2015

l'alphabet de Lorm⁵⁹ et permettant d'utiliser un téléphone portable. Le gant reste complexe et encombrant.



60

Figure 64 : Gant-téléphone

Le dispositif ci-dessous a été développé par l'équipe de Betty Semail⁶¹, le STIMTAC (Stimulateur Tactile). Il est fondé sur le contrôle de la friction entre une surface vibrante et le doigt. Ce sont des céramiques piézo-électriques qui génèrent une onde à fréquence ultrasonore (30 khz) et d'amplitude de 1m. Une surpression encore appelée squeeze film est créée à la surface de la plaque. Cette variation est ressentie par l'utilisateur lorsqu'il frotte son doigt.



cnrs

62

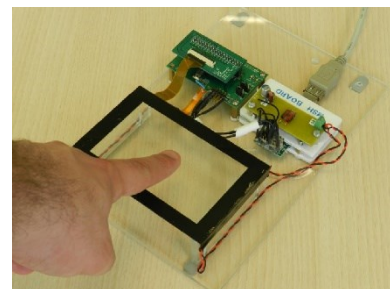


Figure 65 : Simulateur tactile

Les illusions tactiles sont plus difficiles à obtenir que les illusions optiques du fait que la physique du toucher fait appel à des phénomènes multi-échelles (forme, glissement, orientation du bout du doigt, souplesse) (Biet, 2007).

⁵⁹ Technique de communication avec les sourds-aveugles inventée par Heinrich Landesmann. Chaque lettre est positionnée sur la paume de la main. En touchant les lettres, on construit des mots et des phrases.

⁶⁰http://www.handitec.com/gabarits/zz_images/Actualite/Reportage/2013/Peley2013_01Article_nouvelles_technologies_au_service_du_handicap.pdf - consulté le 31 mai 2015

⁶¹ Betty Semail est professeur à Polytech'Lille (Université de Lille 1) / L2EP

⁶² <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/actualites/toucher-le-virtuel-une-realite> - consulté le 31 mars 2019

2.2.1.4 Le goût et l'odorat

Le goût et l'olfaction sont des sens que l'on nomme « chimiques ». Ce sont des sens polysémiques. Bien souvent, les moyens utilisés pour simuler ces perceptions sont à base de cartouches contenant des odeurs.

Le Meta Cookie est un appareillage qui transforme la perception visuelle et la perception olfactive. Un biscuit sans saveur prend différents goûts grâce au système qui trompe l'utilisateur à l'aide de réalité augmentée et d'un distributeur d'odeurs associé au casque.

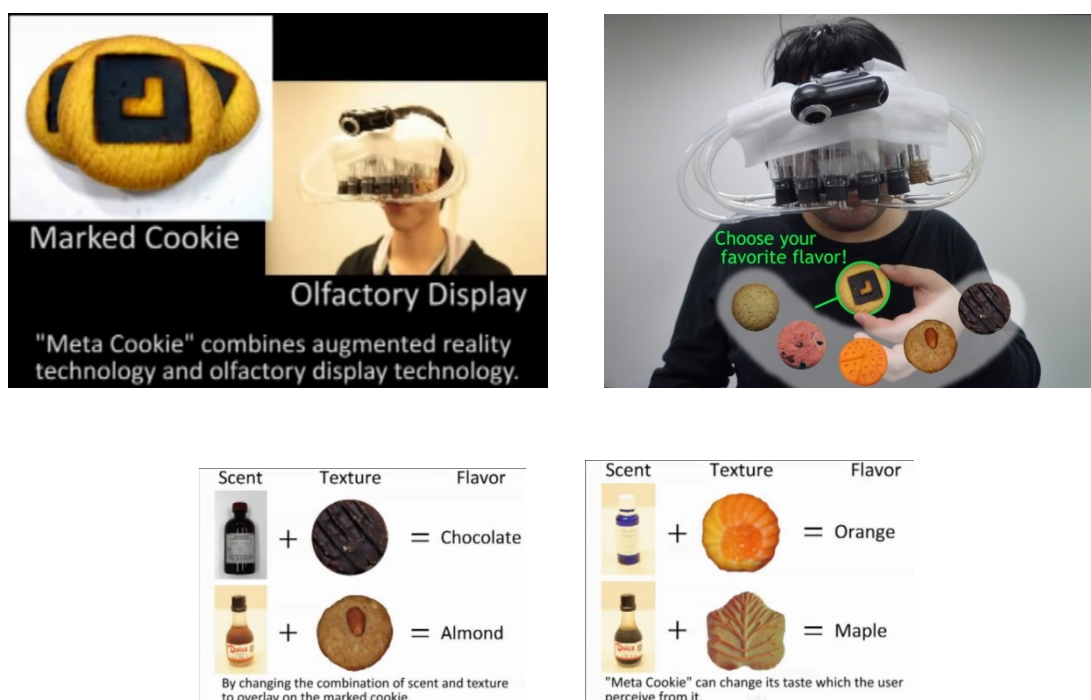


Figure 66 : Meta Cookie ⁶³

Des chercheurs espagnols ont tenté d'imiter le fonctionnement de l'organe du goût à savoir la langue. La langue artificielle ou e-langue est constituée d'un ensemble de 21 capteurs capable de détecter différentes variétés de bière. Les électrodes sont capables de déceler des ions positifs tels que l'ammonium et le sodium ou négatifs comme le nitrate et le chlore qui sont des caractéristiques de types de bière. Le dispositif ne peut reconnaître que des signatures chimiques déjà connues contrairement à ce que sait faire l'humain (Ceto, 2013).

⁶³ <http://www.cyber.t.u-tokyo.ac.jp/~narumi/metacookie.html> (consulté le 15 mai 2015)

Il est vrai que la langue est un organe complexe disposant de nombreuses papilles différenciées qui émettent des signaux spécifiques en fonction des molécules distinguées au niveau de la bouche. Ces signaux sont ensuite envoyés au cerveau pour analyse.

Une sucette numérique à base d'éléments thermoélectriques, mise en place par Nimesha Ranasinghe et sa collègue Ellen Yi-Luen Do de la National University de Singapour, envoie des saveurs sucrées ou épicées en fonction de la chaleur. Les concepteurs envisagent d'intégrer ce système à un verre ou une tasse pour donner un goût sucré aux boissons sans sucre.



Figure 67 : Sucette numérique

La perception gustative comme olfactive n'est pas simple à modéliser. La diversité génétique interindividuelle est sans doute ce qui expliquerait les différences de perception entre les humains et donc la difficulté à les simuler (Le Bon, 2010).

Depuis de nombreuses années, des équipes ont cherché à donner aux usagers la possibilité de bénéficier des odeurs liées à des images. Un problème important était la rémanence.

Une équipe japonaise a développé un produit à base de cartouches olfactives à connecter à un casque de réalité virtuelle. Le système fonctionnerait en bluetooth et serait placé proche du nez de l'utilisateur. Ce dispositif déclenche un signal odorant en fonction de l'environnement virtuel représenté. Il y a cinq cartouches possibles pouvant être remplacées et/ou installées. Pour l'instant il existe quinze parfums.

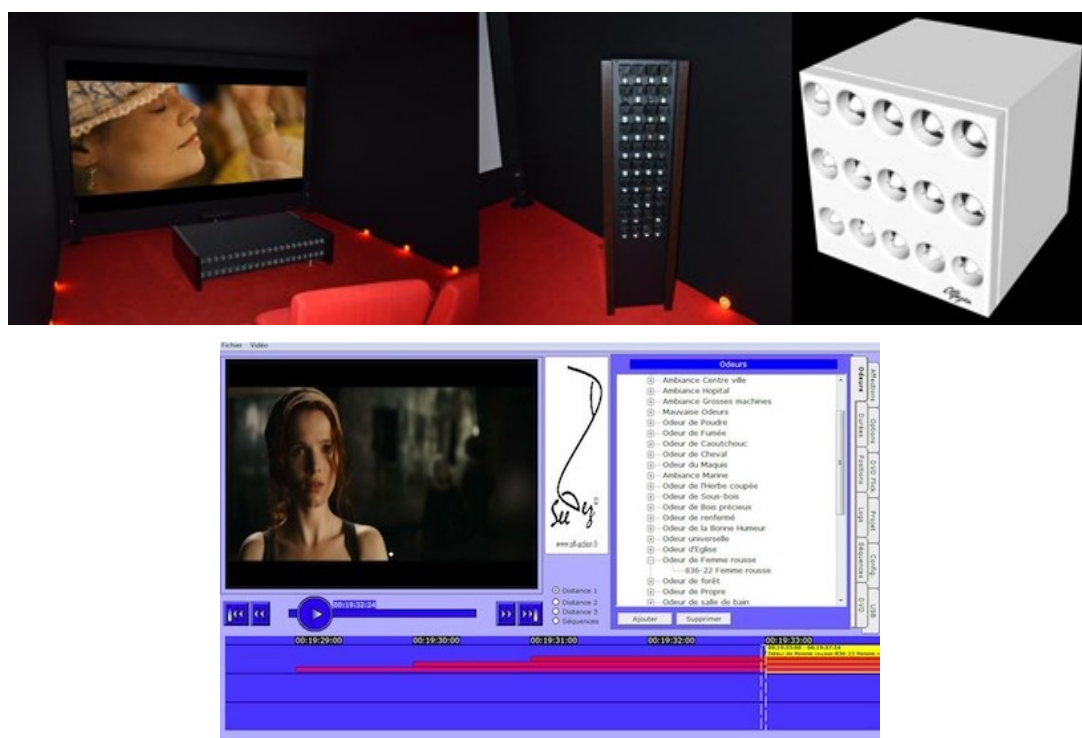
⁶⁴ <https://www.20minutes.fr/high-tech/1394489-20140605-sucette-digitale-affiche-fait-chanter-epices-3-innovations-pleines-gout> - consulté le 31 mars 2019



65

Figure 68 : Cartouches olfactives

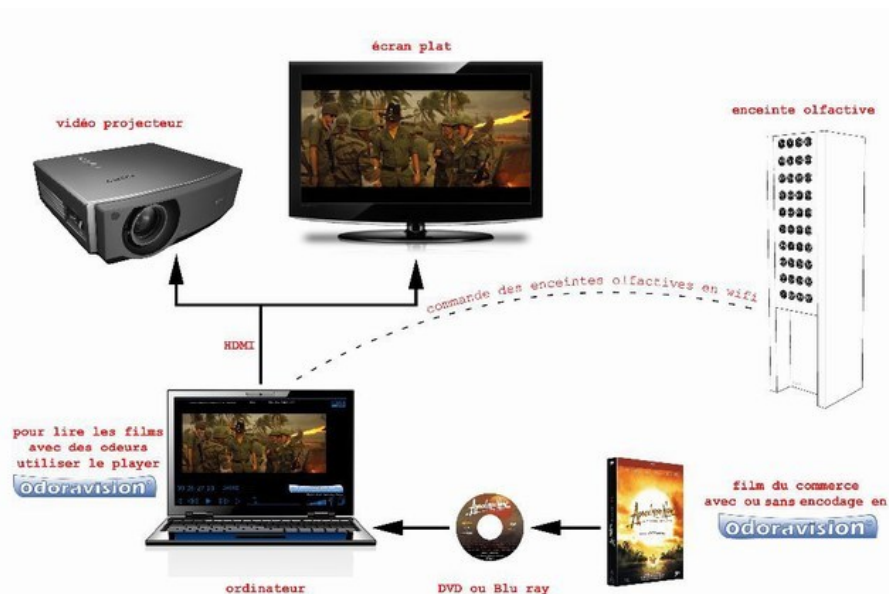
Un autre système, datant de 2015, associe odeurs et images de films. Il s'agit de l'odoravision. La programmation et la diffusion d'odeurs se fait à l'aide du logiciel See-Nez. Au montage, il est possible d'associer une odeur à une image ou à une séquence d'images. Le fichier numérique généré contient un code pour chaque image, un code pour chaque odeur. Une enceinte olfactive se place à côté de l'écran. La synchronisation entre l'odeur et l'image est aussi fonction de la distance du public.



logiciel See-Nez

Figure 69 : Odoravision

⁶⁵ <https://vaqso.com/> - consulté le 31 mars 2019



Voici leurs nouvelles odeurs mises à disposition en 2018.



Figure 70 : Nouvelles odeurs pour odoravision

La perception olfactive commence donc seulement à être intégrée à des systèmes. Elle connaîtra certainement un développement futur.

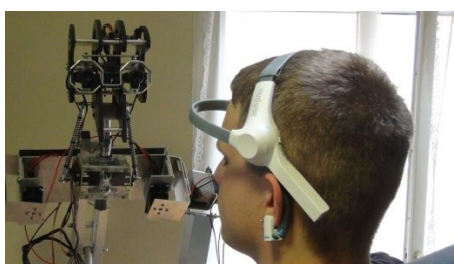
Nous venons de passer en revue certains équipements en relation avec des canaux sensoriels courants liés aux sens de base et servant d'interfaces entre le cerveau et l'environnement immédiat. Pour rappel, les sens transmettent au cerveau des informations qui sont interprétées pour construire une représentation mentale de l'environnement. Cela se traduit par une activité électrique mesurable du cerveau. On retrouve un système approchant dans les principes de l'interface cerveau-machine. Ils sont utilisés au moyen de matériels afin de pallier des déficits fonctionnels (cognitifs ou moteur) mais aussi pour jouer, contrôler divers appareils ou communiquer par la pensée. Nous pourrions éventuellement détourner ces outils pour rendre le jeu plus attrayant en intervenant sur les sens.

⁶⁶ http://www.erenumerique.fr/odeur_jpg-big-7842.html - consulté le 19 mai 2015 et <http://blog.eavs-groupe.com/actualite-de-nos-metiers/les-odeurs-debarquent-dans-votre-home-cinema/> - consulté le 30 mai 2015

⁶⁷ <https://www.odoravision.com/> - consulté le 31 mars 2019

D'autres appareillages ont été conçus, fondés sur la communication cerveau-machine et plus exactement sur l'activité cérébrale. Comme nous l'avons énoncé précédemment, l'activité cérébrale peut être quantifiée et tracée. Les rythmes obtenus dépendent de l'état émotionnel, de l'état de vigilance et de nombreux autres paramètres comme les états psychologiques, pathologiques. L'état émotionnel est un paramètre clé dans notre étude sur les échanges homme environnement et la rétroaction biologique. Nous présentons donc quelques exemples d'appareillages usant de l'activité cérébrale.

Le casque NeuroSky Mindwave Mobile est un capteur de type électro-encéphalogramme (EEG). Le casque lit, mesure et transfère sans aucun risque les données spectrales de puissance (ondes alpha, ondes beta, etc) i.e. les ondes cérébrales via Bluetooth pour communiquer sans contact avec l'ordinateur ou appareil sous iOS ou Android. Un convertisseur les transforme afin de piloter un système motorisé.



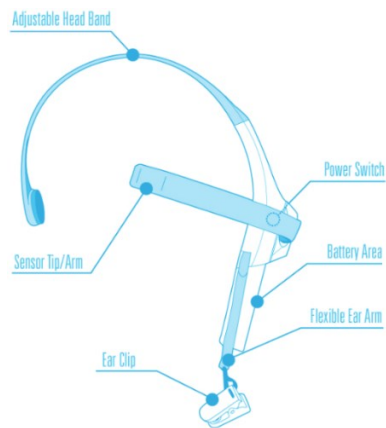
Pilotage d'un servomoteur ou d'une sortie avec les ondes cérébrales (Version 12/05/2014). Il s'agit du casque Neurosky.⁶⁸

Figure 71 : Neurosky

Ce dispositif dispose d'un kit de développement⁶⁹ pour écrire ses propres programmes et interagir avec l'esprit Wave mobile, les outils de développement sont gratuits. La figure ci-dessous décrit brièvement le casque. On peut voir deux capteurs un frontal sur le bras articulé et un au niveau de la pince se plaçant sur l'oreille.

⁶⁸ <http://www.redohm.fr/wp-content/uploads/2014/07/REDOHM-NEUROSKY-0002.jpg> - consulté le 1er juin 2015

⁶⁹ <http://neurosky.com/2018/05/bci-how-to-start-developing-for-eeeg-headsets/> - consulté le 5 avril 2019



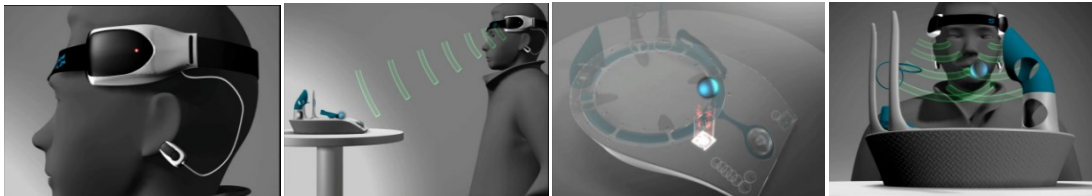
70

Figure 72 : Description des différentes parties du Neurosky

Cet appareil nous a servi dans une de nos expériences en tant que matériau expérimental mais pas pour mesurer des ondes cérébrales.

D'autres matériels comme le Mindflex utilise aussi les "ondes cérébrales" pour commander une balle à travers un parcours d'obstacles. La commande se fait par le biais d'un casque et de capteurs de type EEG. Les signaux recueillis par les capteurs sont transmis à un ventilateur qui fait léviter la balle.

Il se joue soit en mono-joueur



soit en duel



71

Figure 73 : Mindflex

Les nekomimi, qui signifient « oreilles de chat » en japonais, peuvent être portés non seulement comme un serre-tête comportant des oreilles de chat mais aussi en queue de chat. Ils disposent de

⁷⁰ http://download.neurosky.com/support_page_files/MindWaveMobile/docs/mindwave_mobile_user_guide.pdf
- consulté le 5 avril 2019

⁷¹ <http://www.geekalerts.com/mindflex-duel/> - consulté le 1^{er} juin 2015

trois capteurs qui analysent les signaux électriques (type EEG) de la personne qui les porte. Les oreilles bougent et expriment "l'émotion" du porteur en fonction de l'information recueillie et traduite. Ce sont des jouets appartenant aux prothèses émo-kawaii. Elles offrent une forme de communication.



72

Figure 74 : Necomimi et communication

Avec ces différents dispositifs EEG grand public nous sommes loin des matériels professionnels mais ils peuvent faire partie d'un environnement interactif ludique.

Le dernier appareil, The audeo, est un moyen de transmettre la voix sans faire usage de sa voix. Il détecte l'activité électrique entre le cerveau et les cordes vocales puis la transforme en un discours sur des enceintes.

⁷² <http://www.lesnumeriques.com/necomimi-neurowear-devenez-votre-propre-lolcat-n25448.html> (consulté le 1er juin 2015)

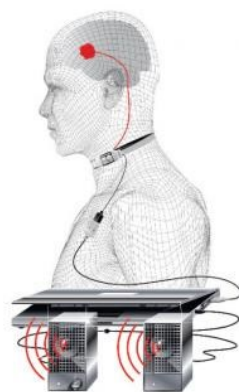


Figure 75 : Audeo

The Audeo: How It Works« Three electrode sensors on the user's neck capture electrical signals between the brain and the vocal cords. The device's processor sends the amplified signals to computer software, which decodes them and turns them into spoken words that can be heard through the speakers Bland Designs ». ⁷³

La production du langage est sous contrôle des aires sensori-motrices dans le cerveau, notamment de l'aire motrice qui contrôle les muscles du larynx. L'Audeo est donc un appareil qui capte les signaux électriques qui vont du cerveau aux cordes vocales. Il ne nécessite aucun mouvement physique ni aucune intervention chirurgicale invasive et pourrait changer la façon dont les gens interagissent avec les ordinateurs.

Au final, nous n'en sommes pas à la vision à distance, à la clairaudience, à la transmission de pensée, la précognition ou rétro-cognition dans le sens de perception extra-sensorielle mais nous pourrions peut-être approcher ce type de perception à l'aide d'exo-capteurs. Il est également important d'aborder un autre domaine lié à la rétroaction qui est au cœur de l'étude. Il s'agit de la cybernétique ou bionique. Ces éléments font l'objet de la partie qui suit.

2.2.2.2. Autres principes : cybernétique, bionique et biométrie

La cybernétique en tant que « *théorie entière de la commande et de la communication, aussi bien chez l'animal que dans la machine* » (Weiner, 2014) est un mouvement qui a donné lieu dans les années 40 et 50 à des travaux regroupant mathématiciens, logiciens, ingénieurs, physiologistes, anthropologues, psychologues... Les travaux portent sur la rétroaction ou mécanisme

⁷³ <http://www.popsoci.com/scitech/article/2009-05/electronic-voice-box> (consulté le 1er juin 2015)

téléologique. Les conséquences de la cybernétique même si celle-ci fut très rejetée a influencé de nombreux domaines tels que l'ingénierie, la biologie, l'informatique, la sociologie et a permis l'émergence des sciences cognitives ou encore de la robotique. Le mot cybernétique vient du grec « κυβερνητική » (prononcé : kyvernitikís) et désigne le pilotage des bateaux ou encore le gouvernail. Le terme fut choisi par Norbert Wiener, fondateur de la cybernétique.

Dans les années 60 apparaît le mot bionique qui vient de la contraction de biologie et d'électronique. Il s'agit d'une science qui construit des modèles à des fins technologiques à partir de systèmes naturels biologiques. L'expression est récente mais le principe est ancien. L'homme a toujours essayé de copier la nature pour inventer de nouveaux objets par mimétisme ou biomimétisme. Les chercheurs sont toujours en quête d'études des végétaux, des animaux et des minéraux qui restent des modèles d'inspiration. La médecine a bénéficié des progrès technologiques de la bionique. Il est possible aujourd'hui de réaliser des membres ou des organes capables de communiquer avec le cerveau.

Pour appréhender de nouvelles interactions associées au confort, bien-être ou plaisir, et chercher à satisfaire des désirs, il est nécessaire de mieux comprendre l'homme. L'évolution des connaissances, des technologies, des matériaux nous dévoile de plus en plus d'informations sur la structure et le fonctionnement du monde et en particulier du vivant donc de l'homme. Les études menées sont souvent issues de la biométrie. Les technologies ou techniques cherchant à mesurer les activités électriques physiologiques en font partie et sont principalement utilisées dans le domaine médical. Elles sont souvent envahissantes comme les techniques d'imagerie par résonance magnétique (IRM).

Les dispositifs ou méthodes nous renseignent sur l'activité de notre corps. Ils peuvent être invasifs (introduction dans le corps), mini-invasifs (introduction moindre dans le corps), non-invasifs (à la surface du corps) ou encore dans un environnement proche du porteur - ce sont dans ce cas des exo-capteurs.

Le moment est venu de clarifier l'utilisation des mots invasifs, non invasifs et tous leurs dérivés. L'invasivité est très différente selon les approches. En effet, son utilisation dans d'autres contextes que le nôtre change. La définition d'invasif donnée par Larousse⁷⁴ indique qu'une technique invasive est : « *une méthode d'exploration médicale ou de soins nécessitant une lésion de l'organisme* ». Nous sommes d'accord avec cette définition mais nous apportons un complément.

⁷⁴ https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/invasif_invasive/44072 - consulté le 5 avril 2019

Pour nous, les dispositifs sont dits « invasifs » dès qu'ils touchent le corps que ce soit de manière intrusive pour les cellules du corps, pour les tissus ou de manière superficielle c'est-à-dire à la surface de la peau. Dans le premier cas, des incisions ou introduction de corps étrangers sont nécessaires, nous les définirons comme très invasifs. Il existe également des techniques mini-invasives, elles sont, de notre point de vue, très invasives. Il s'agit de techniques chirurgicales qui limitent le traumatisme opératoire car les incisions sont petites. Les dispositifs à la surface de la peau que l'on dit non invasifs seront considérés invasifs ou légèrement invasifs dans notre étude car gênant les mouvements, dérangeant l'utilisateur et entravant sa pleine immersion. Nous définissons les appareillages comme non invasifs à partir du moment où ils sont sans contact, donc distants, offrant une grande liberté de mouvement et d'action ou faisant partie de l'environnement du jeu.

Notre position sur l'invasivité concerne principalement les mesures physiologiques dont nous avons besoin et qui passent le plus souvent par des dispositifs médicaux ou s'en rapprochant et posés sur une partie du corps ou y entrant (orifices naturels) entraînant une incommodation. En ce qui concerne l'interaction avec le jeu, certaines interfaces peuvent être considérées comme le prolongement du corps si elles ne sont pas trop encombrantes ou faisant partie de la communication avec l'environnement. Une baguette interactive, ainsi un bâton de sorcier ou de mage par exemple, ou bien encore un bracelet ou une bague peuvent être considérés comme faisant entièrement partie du gameplay contrairement aux lunettes de réalité virtuelle dont l'encombrement et la gêne se font bien sentir. Les aperçus ci-dessous illustrent nos propos. Les premières images montrent des méthodes très invasives.

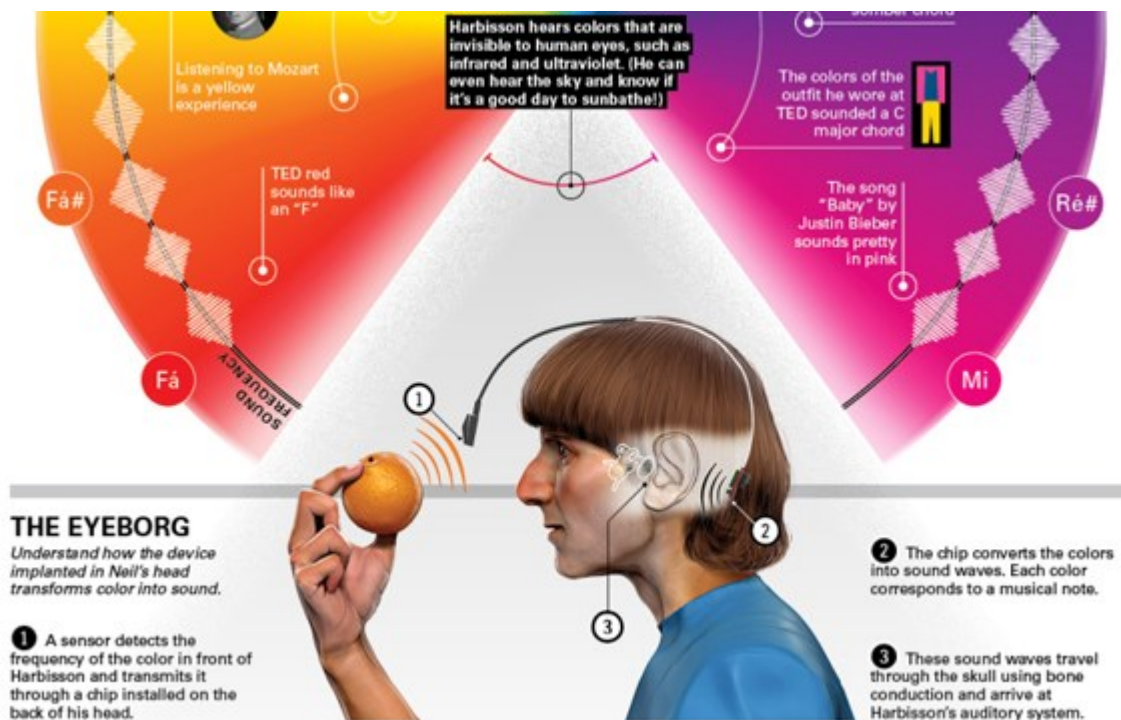
Le premier exemple montre un implant cérébral qui permet aux personnes atteintes de paralysie de retrouver les fonctions motrices du bras et de la main. On constate deux parties importantes au niveau du crâne qui correspondent aux implants intracérébraux. Ici on est en présence d'une personne tétraplégique. Il s'agit d'un dispositif intrusif donc très invasif.



75

Figure 76 : Implants cérébraux sur personne paralysée

Le deuxième exemple porte sur un dispositif implanté à l'arrière du crâne dans l'os et muni d'une caméra servant d'œil.



76

Figure 77 : Implant transcrânien et œil robotique

C'est l'œil robotique (eyeborg) installé sur sa tête par ancrage osseux qui permet à ce daltonien d'entendre les couleurs. Chaque couleur correspond à un son que Neil Harbisson a dû apprendre. Sans cet œil, il voit le monde en nuances de gris. Un capteur détecte la fréquence de la couleur qui

⁷⁵ <http://www.leparisien.fr/laparisienne/sante/totalement-paralyse-il-reussit-a-se-servir-de-son-bras-grace-a-des-implants-cerebraux-29-03-2017-6805446.php> - consulté le 5 avril 2019

⁷⁶ <https://ideas.ted.com/tag/neil-harbisson/> - consulté le 5 avril 2019

est traduite en une onde qui circule au travers de l'os du crâne jusqu'au système auditif. Cet équipement est très invasif.

Le troisième exemple, très invasif, présente le body hacker Tim Cannon qui s'est fait implanter sous la peau du bras un système électronique pour mesurer en permanence ses données physiologiques transmises à un ordinateur.

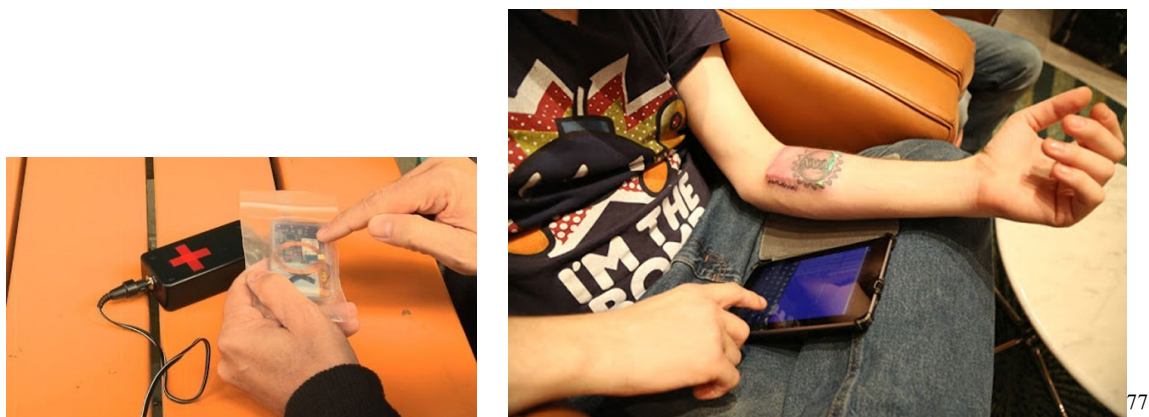


Figure 78 : Implant sous peau pour mesures physiologiques

Les images suivantes proposent des exemples de procédés que l'on dispose sur la peau que nous considérons aussi comme invasifs.

Le premier exemple est un cardiofréquencemètre se plaçant sur la peau au niveau du thorax. Ce dispositif peut être gênant pour l'utilisateur du fait de sa position. Nous avons exploité ce type de matériel afin de pouvoir le comparer à du matériel non invasif. En effet, plus on est proche de l'organe nous procurant la mesure plus la mesure devrait être fine, d'où la nécessité d'établir un rapprochement entre cette ceinture thoracique et la technique sans contact.



Figure 79 : Cardiofréquencemètre

Le deuxième exemple est bien aussi une entrave dans l'utilisation de la main. Il s'agit d'un oxymètre qui mesure également les pulsations cardiaques. Dans le cas d'un jeu, ce matériel

⁷⁷ <https://www.chambre237.com/un-humain-biohacke-son-propre-corps-avec-un-implant-circadia/> _ consulté le 5 avril 2019

⁷⁸ <https://www.cdiseout.com/le-sport/fitness-musculation-yoga/ceinture-cardiofrequencemetre-bluetooth-cardio-run/f-121041704-auc2009895508460.html> - consulté le 6 avril 2019

entraverait la manipulation d'objets comme un clavier et une souris, pour ne parler que d'interfaces très classiques en informatique.



Figure 80 : Oxymètre

Ce troisième exemple est l'emploi d'un casque de réalité virtuelle. Comme nous pouvons le voir il enveloppe le visage et dispose de manettes pour l'interaction. Les manettes en soi ne sont pas dérangeantes puisqu'elles constituent les objets à manipuler dans l'application ou le jeu et forment, comme vu précédemment, une extension de la main pour atteindre le but. Par contre, le casque est lourd et souvent non adapté au port de lunettes de vue. Il y a eu malgré tout de gros progrès de réaliser dans l'élaboration des casques de ce type en particulier au niveau de la latence qui provoquait le phénomène de « Motion Sickness⁸⁰ ».



Figure 81 : Casque de réalité virtuelle associée à des manettes

L'exemple ci-dessous s'apparentent aux manettes dont nous venons de parler à l'instant et entre dans les objets du jeu. Il s'agit du bâton de mage, objet appartenant totalement au jeu ou à l'univers dans lequel évolue l'utilisateur ou le joueur.

⁷⁹ <http://explorecuriocite.org/Explorer/ArticleId/4574/activit-cardiaque-lvolution-des-instruments-de-mesure.aspx> - consulté le 6 avril 2019

⁸⁰ La cinétose ou mal des transports

⁸¹ <https://www.stuffi.fr/guide-comparatif-meilleur-casque-de-realite-virtuelle-2017/> - consulté le 6 avril 2019



Figure 82 : Bâton de mage du monde réel

Pour compléter notre propos, les éléments ci-après entrent dans les dispositifs non invasifs tels que nous l'entendons :

- Un thermomètre infrarouge comme appareil de mesure de la température sans contact. Le thermomètre infrarouge permet la mesure de la température sans contact à travers la radiation infrarouge d'un corps. Il intègre un rayon laser pour pouvoir indiquer le point de mesure. Il mesure ainsi seulement la température superficielle de tout objet visible.
- Un vêtement intelligent a été créé par des chercheurs du Centre d'optique, photonique et laser (COPL) de l'Université de Laval rendant possible la mesure à distance et en temps réel de la fréquence respiratoire de la personne qui le porte. Ceci oblige à avoir un vêtement disposant d'une antenne fixée sur celui-ci au niveau de la poitrine. Elle est faite d'une fibre optique creuse dont la paroi intérieure est recouverte d'une mince couche d'argent. Un polymère déposé sur la couche extérieure de la fibre assure la protection de l'ensemble. *« Cette antenne sert à la fois de capteur et d'émetteur des signaux induits par les mouvements respiratoires » ... « Les données peuvent être transmises au téléphone intelligent de l'utilisateur ou à un ordinateur situé à proximité »* selon le professeur Messaddeq⁸³. Si ce vêtement est propre à chacun et fait partie de son habillement, nous pouvons le considérer comme non invasif, dans le cas contraire, il entre dans les dispositifs invasifs.
- EQ-Radio⁸⁴ est une technologie qui semble déduire les émotions d'une personne en utilisant des signaux sans fil. Il transmet un signal radio fréquence et analyse ses réflexions sur le corps d'une personne pour reconnaître son « état émotionnel » (heureux, triste, etc.). Le facteur clé serait un algorithme permettant d'extraire les battements de

⁸² <https://www.flickr.com/photos/108650499@N08/15561891345/in/photostream/> – consulté le 6 avril 2019

⁸³ Younes Messaddeq est titulaire de la Chaire d'excellence en recherche du Canada sur l'innovation en photonique dans le domaine des télécommunications et de l'information, Université Laval, depuis 2010

⁸⁴ <http://eqradio.csail.mit.edu/> - consulté le 6 avril 2019

cœur individuels du signal sans fil avec une précision comparable à celle des moniteurs d'ECG sur le corps (Zhao, 2016).

- Une caméra thermique fournit des mesures précises, quantifiables et sans contact des écarts thermiques sans affecter la cible. Elle peut permettre les mesures fines des variations de la température. En fonction du modèle, les mesures peuvent être effectuées en mouvement.

Sur la figure suivante, issue de Dittmar (2004), est mentionnée la plupart des mesures dites non invasives et invasives pour nous. C'est une bonne synthèse des mesures potentielles pouvant être pratiquées sur l'humain. Elle nous a permis de nous situer et de trouver différentes techniques liées aux micro et nanotechnologies.

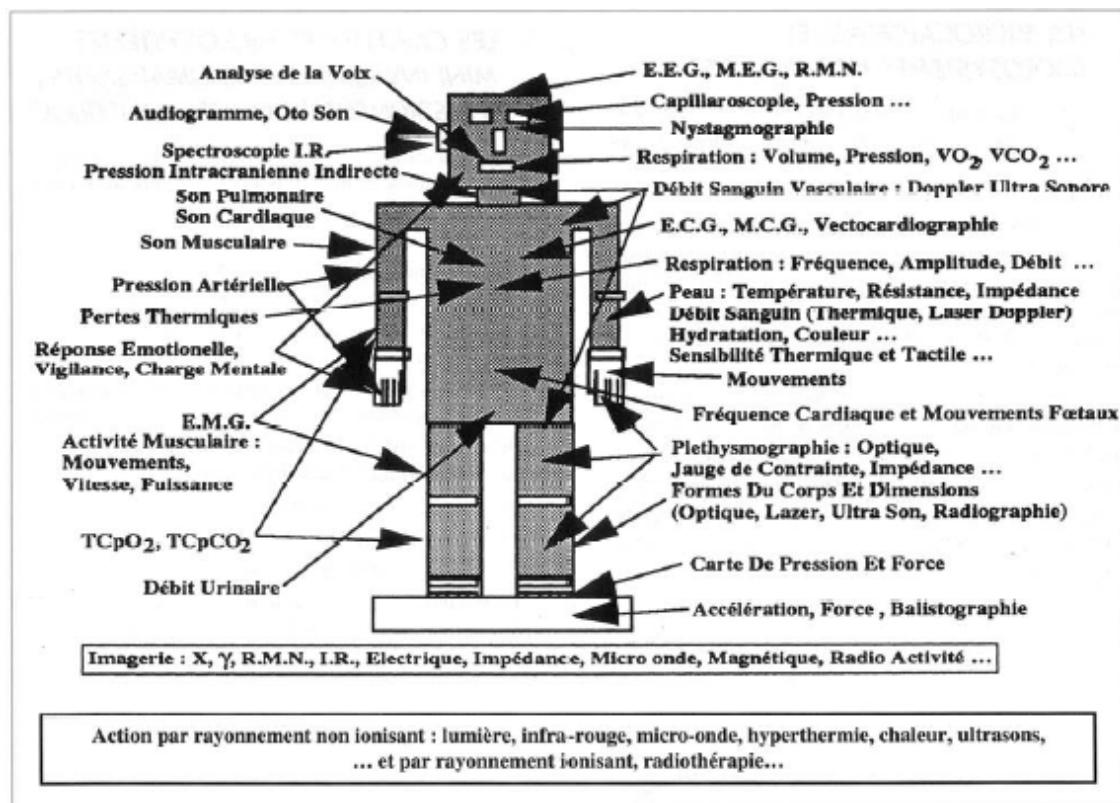


Figure 83 : Synthèse de mesures potentielles sur l'humain

Les micro/nanotechnologies se révèlent comme une source importante en génie biomédical. De par la miniaturisation des composants et la baisse des coûts, l'acquisition de matériels biomédicaux se popularise et permet ainsi un élargissement des études. De nombreux objets connectés nous entourent et ont changé notre vie : de la brosse à dents au réfrigérateur en passant par les bracelets ou pèse-personne permettant le « quantified self⁸⁵ » ou le « self tracking⁸⁶ ». Colombain (2015)

⁸⁵ Qui représente la collecte et le partage de certaines données personnelles.

⁸⁶ Qui permet l'enregistrement de données biologiques ou de la vie quotidienne.

offre une sélection d'objets connectés couvrant la santé et le bien-être, la communication, la maison ou la vie pratique, dans ce vaste univers des objets usuels dotés de fonctions de communications et d'une forme d'intelligence.

Les capteurs non invasifs constituent une piste intéressante dans notre projet pour les raisons évoquées plus haut. Parmi les capteurs légèrement invasifs, du fait de leur présence en surface de la peau, présentés en annexe 10, il y a ceux dits thermo-vasculaires qui mesurent les caractéristiques de thermorégulation comme la température (T°), ceux dits bioélectriques qui mesurent les variations électriques à la surface du corps comme l'activité électrodermale (GSR) ou des muscles et ceux dits cardio-respiratoires qui mesurent la fréquence cardiaque (CFM) ou respiratoire (respiration).

Nous nous sommes servis de quatre de ces capteurs (GSR, CFM, T° et respiration) dans les premières expérimentations présentées en annexe 10. Il s'agit dans l'étude globale de trouver les pendants distants offrant les mêmes données de manière à pouvoir appliquer notre modèle d'analyse présenté dans le chapitre sur les données. Nous avons envisagé et évoqué certains procédés distants pour remplacer nos capteurs de contact comme l'infrarouge, les radio fréquences. Ils feront l'objet d'une autre étude.

2.3. Affectique

Pour faire écho au chapitre sur les émotions qui sont au cœur de nos préoccupations, tout comme les procédés permettant à l'humain d'obtenir un environnement qui s'adapte à son état émotionnel, ce chapitre sur les interactions a montré l'importance de prendre en compte l'utilisateur. Tout le monde s'accorde sur le fait que l'émotion est fondamentale dans l'expérience humaine, quelle qu'elle soit, car elle influence la cognition, la perception et les actions quotidiennes telles que l'apprentissage, la communication et les prises de décisions. Les concepteurs d'applications, de produits, de matériels divers, d'interactions se sont rendus compte qu'ils ont eu tort d'ignorer les émotions car elles impactent notre vie, nos choix. Depuis quelques années, elles sont au centre des investigations. Il est vrai que les mesurer est complexe. La recherche s'en est saisie et a donné naissance au domaine combinant l'ingénierie, l'informatique, la psychologie, les sciences cognitives, les neurosciences, la sociologie, la psychophysiologie, l'éthique... que l'on nomme « l'affective computing » ou « l'informatique affective ».

2.3.1. Définition

Ce terme d'affective computing est issu d'un texte fondateur de Rosalind Picard (1995, 2000, 2004) qui dit que « *l'informatique affective est une informatique qui se rapporte à, découle de, ou influence délibérément des émotions* »⁸⁷ ou d'autres phénomènes affectifs.

2.3.2. Les voies de l'informatique affective

L'affective computing fédère trois grandes voies :

- la reconnaissance des émotions humaines
- le raisonnement et la prise de décision associant les informations émotionnelles
- la génération d'expressions émotionnelles via la programmation.

La détection, l'interprétation, la compréhension des émotions leur simulation et le déclenchement d'une action associée sont du domaine de l'intelligence artificielle (IA). Heudin (2017) permet de se familiariser avec cette IA de façon simple et ludique au travers des « en-jeux » scientifiques, communautaires, économiques et éthiques.

Nous sommes tout à fait dans cette mouvance puisque nous cherchons à détecter, par le biais d'interactions, une biométrie des états émotionnels afin d'y lier une action adaptée.

Plutôt qu'informatique affective ou informatique émotionnelle, nous préférons le terme d'affectique car ce n'est pas l'informatique qui a trait aux émotions ou qui concerne les sentiments ou émotions. L'informatique est une technique, un outil de traitement et de restitution, d'où affectique pour traduire la science du traitement informatisé de l'affect, l'affect étant, comme indiqué dans wikipédia, « *un état d'esprit tel qu'une sensation, une émotion, un sentiment, une humeur* ».

Si l'émotion est fondamentale dans l'expérience humaine, sa compréhension est indispensable dans la conception des technologies, de l'environnement et nécessite l'utilisation de l'informatique, de l'intelligence artificielle, des sciences cognitives... C'est en cela que les interactions humain environnement vont changer.

Contrairement aux travaux menés en robotique ou autour des agents virtuels, en matière de simulation ou d'expression émotionnelle, notre but n'est pas de permettre à la machine de disposer d'émotions pour ressembler à l'humain mais d'être en capacité de découvrir les émotions ou états émotionnels de l'utilisateur afin de lui transmettre et/ou proposer une réponse adaptée à l'activité en cours. Ainsi, en connaissant ses états émotionnels, il sera possible de lui fournir des scénarii et

⁸⁷ « I call « affective computing, » computing that relates to, arises from, or deliberately influences emotions »

lui faire vivre d'autres émotions et, au final, grâce aux technologies de pointe de se trouver ou se retrouver.

Dans la modélisation des émotions au niveau des machines, il n'y a aucun réel sentiment. Elles ne font que ce pour quoi elles sont programmées, même si elles peuvent sembler comprendre et simuler des expressions émotionnelles dans les gestes, les expressions vocales ou faciales comme certains robots tels que Pepper, humanoïde conçu pour l'interaction avec les humains, Paro, le robot émotionnel socio-éducatif utilisé dans l'animation, les thérapies pour les malades d'Alzheimer et maladies apparentées, Matilda, un PaPeRo (Partner Personal Robot – robot partenaire personnel), destiné à tenir compagnie aux personnes handicapées et aux personnes âgées ou Buddy, le premier robot compagnon familial. C'est l'humain par transposition, projection personnelle qui rend la machine ou l'objet presque anthropomorphique.

2.4. Conclusion

Dans cette partie, nous avons énoncé différentes définitions relatives aux interactions et à la manière de les aborder intelligemment, en mettant l'utilisateur, l'expérience utilisateur, au cœur de la réflexion. Nous avons ainsi pu montrer combien de nombreux paramètres influent sur le processus de perception via les sens. Les émotions, par exemple, sont un facteur primordial. Nous avons exposé différents dispositifs sensoriels plus ou moins invasifs pouvant simuler des situations plus ou moins immersives. Comme nous nous sommes fixés, pour une plus grande liberté d'action, d'immersion et de bonne communication, de remplacer le matériel de captation de surface corporel et invasif par des éléments non invasifs, la première phase du travail a consisté, au vu de l'existant, en l'emploi de capteurs de contact afin d'établir un système étalon, une référence, avant d'en changer. Les micro et nano technologies nous ont offert des possibilités auxquelles nous n'aurions pas pu accéder il y a encore quelques années. Nous avons également cherché d'autres moyens d'obtenir des indicateurs biologiques. La prospection a donné des pistes de substitution à base d'ondes radio, infrarouges ... Il faudra par la suite s'assurer que les relevés soient équivalents. C'est l'intelligence artificielle au sens large qui nous aidera à prendre des décisions grâce à des méthodes mathématiques, statistiques et d'apprentissage dont nous avons parlées dans le chapitre sur les données. C'est elle qui nous permet de détecter les schémas de conception de reconnaissance d'états émotionnels, de patrons. Et contrairement à ce que l'on pourrait penser, elle ne constitue pas la source émotionnelle, elle n'exprime pas les émotions comme le dit Heudin (2017), elle constitue l'outil indispensable à la construction d'algorithmes d'analyse, de

compréhension et de propositions. Tout comme nous avons défini et soumettons le terme affectique à la place d'informatique affective afin de mieux nous positionner.

Notre travail ne se restreint pas à cela. Il s'intéresse aussi aux moyens à mettre en œuvre dans le jeu à savoir les outils et interfaces interactives comme par exemple le tissu et l'encre conducteurs ou autres dispositifs visuels ou sonores tels que présentés dans le chapitre sur les réseaux et faisant partie de l'univers ludique. Pour l'instant, nous nous focalisons sur un espace interactif ambiant, jeu pervasif appréhendé dans le chapitre 5 sur le jeu. Nous voulons aussi, par la suite, nous intéresser au jeu vidéo sous sa forme plus classique.

Au final, notre projet se veut de proposer de nouvelles interactions sur deux plans :

- Le plan des mesures biométriques
- Le plan interactionnel ludique.

2.5. Bibliographie

Abdat, F. 2010 Reconnaissance automatique des émotions par données multimodales : expressions faciales et signaux physiologiques – thèse soutenue le 15 juin 2010 à l’université Paul Verlaine de Metz

Ang, D., 2017. Difficulty in video games. ACM C&C’17 june 2017 Singapore

APCI, 2013 « Le design des interfaces numériques en 170 mots-clés : des interactions homme-machine au design interactif, Dunod, Paris 2013

Axisa F., Schmitt P.M., Gehin C., Delhomme G., McAdams E., and Dittmar A., Flexible Technologies and Smart Clothing for Citizen Medicine, Home Healthcare, and Disease Prevention, IEEE transactions on information technology in biomedicine, vol. 9, n° 3, September 2005

Beaudouin-Lafon, M., 2016 50 ans d’interaction homme-machine : retours vers le futur. *Interstices*, INRIA, 2016. <inria-00174327v2>

Beaudouin-Lafon M., 2004 Designing interaction, not interfaces, AVI '04 Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces pp 15-22 ACM DL

Berthoz, A., 1997 Le sens du mouvement, Odile Jacob

Biet, M. 2007 Conception et contrôle d'actionneurs électro-actifs dédiées à la stimulation tactile – thèse soutenue le 13 décembre 2007 à l’université des sciences et technologies de Lille spécialité Génie électrique

Caelen J. et al., OFTA 1996 Nouvelles Interfaces Homme-Machine, Observatoire Français des Techniques Avancées, Diffusion Lavoisier, Paris Décembre 1996, ISBN 2-906028-04-5. Chapitre 1

Caelen J., 2007 Interaction et pragmatique : jeux de dialogue et de langage, Science informatique et SHA, Hermès science publications, 2007

Calvary G. et al., 2016 Composition opportuniste de fragments d'IHM pour une interaction adaptative en environnement ambiant. Ubimob 2016, Lorient, juillet 2016.

Cannan J., Hu H., 2011 Human-Machine Interaction (HMI) : A survey, Technical report : CES 508, School of Computer Science & Electronic Engineering, University of Essex

Card, S.K., Moran, T.P., Newell, A., 1983 *The Psychology of Human-Computer Interaction*, Editions Lawrence Erlbaum Associates, 1983

Cetó, X., Gutiérrez-Capitán, M., Calvo, D., del Valle, M. 2013 Beer classification by means of a potentiometric electronic tongue - Food Chemistry Volume 141, Issue 3, pp 2533-2540

Claverie B. 2010 L’homme augmenté, Néotechnologies pour un dépassement du corps et de la pensée. Col: Cognition et Formation. L’Harmattan. 2010.

Clerc, M., Bougrain, L., Lotte, F., 2016 (sous la direction de). Les interfaces cerveau-ordinateur 1 - fondements et méthodes – Editions ISTE

Clerc, M., Bougrain, L., Lotte, F., 2016 (sous la direction de). Les interfaces cerveau-ordinateur 2 - technologies et applications – Editions ISTE

Colombain, J., Lecomte, Y., Sorel, F. 2015 Ces objets connectés qui vont changer votre vie – Editions First

Dittmar, A., Gehin, C., Delhomme, G. 2004. Spécificités des micro et nanotechnologies liées au biomédical.

Dittmar, A., Delhomme, G., Roussel, Ph., Barbier, D. 1997. Les microcapteurs et microsystèmes biomédicaux - Revue de l'électricité et de l'électronique n° 8 septembre 1997

Dittmar, A., Gehin, C., McAdams, E., Rmon, C., Meffre, R., Nocua R., Delhomme, G. 2007 Microcapteurs, vêtements, habitats intelligents pour le monitoring permanent : impact sociétal et éthique, Editions Dalloz, 3^e partie du livre La nanomédecine – Enjeux éthiques, juridiques et normatifs décembre 2007

Dortier, J.F., 2014 (sous la direction de). Le cerveau et la pensée, le nouvel âge des sciences cognitives sous la direction de Jean-François Dortier, Editions Sciences Humaines

Heudin, J.C., 2017 Intelligence Artificielle – Manuel de survie, Editions Science eBook

Hoc, J.M. 1999 Conditions et enjeux de la coopération homme machine dans le cadre de la fiabilité des systèmes. In J. G. Ganascia (Eds.), Sécurité et cognition (pp. 147-164). Paris : Hermès.

Hoc, J. M. 1998 L'ergonomie cognitive un compromis nécessaire entre des approches centrées sur la machine et des approches centrées sur l'homme, Actes du colloque « Recherche et Ergonomie », Toulouse, février 1998

Karray F., Alemzadeh M., Abou Saleh J., Nours Arab M., 2008 Human-Computer Interaction: Overview on State of the Art, International journal on smart sensing and intelligent systems, vol., n° 1, march 2008

Kolski, C., Boy, G.A., Mélançon, G., Ochs, M. & Vanderdonckt, J. 2013. Fertilisation croisée entre interaction personne-système et intelligence artificielle. Marquis P., Papini O., Prade H. (eds). L'intelligence artificielle : frontières et applications. Editions Cépaduès, Toulouse, France, Vol. 3, Chapitre 11, pp. 1117-1141.

Le Bon, A.M., Briand, L., 2010. La Lettre d'ORL et de chirurgie cervico-faciale - Dossier thématique Spécial "Odorat" - n° 321 - avril-mai-juin 2010

Levieux, G., 2011. Mesure de la difficulté des jeux vidéo – thèse de doctorat du Cnam 2011

Marty D. 2015 Le patient d'hier d'aujourd'hui et de demain dans l'enjeu des reconstructions maxillo-faciales – thèse soutenue en chirurgie dentaire le 5 mars 2015 à l'université de Toulouse III

Lieury, A., 2008 Psychologie cognitive Dunod

- Maybury, M. T. 1999 Intelligent user interfaces : an introduction (tutorial notes).
- Nielson, J., 1994. Usability Engineering - Edition Morgan Kaufmann, 1994
- Picard R.W. 2004 Affective computing : challenges, rapport interne du MIT Media Lab Cambridge, MA USA 2004
- Picard R.W. 2000 Affective computing - MIT Press 2000
- Picard, R.W., 1995 Affective computing – MIT technical report n° 321
- Rao P.N.R., 2013 Brain Computer Interface - An introduction, Cambridge University Press, 30 septembre 2013
- Roudaut A., Coutaz J., 2006 Méta-IHM ou comment contrôler l'espace interactif ambiant, Ubimob 2006, Cnam Paris septembre 2006
- Tijus, C., 2004 Introduction à la psychologie cognitive, Armand Colin
- Weiser, M., 1991 The computer for the 21st century. Scientific American, 265(3), 94-104, 1991
- Weiser, M., Brown J.S., 1996 The coming age of calm technology, Xerox Parc, 1996
- Wickens, C.D. (1984). Engineering Psychology and Human Performance, Charles E. Merrill Publishing Company, 1984
- Wiener, N., 2014 La Cybernétique : Informatique et régulation dans le vivant et la machine, Seuil
- Zhao, M., Fadel, Adib F., Katabi, D., 2016 Emotion Recognition using Wireless Signals - MobiCom'16, October 03 - 07, 2016, New York City, NY, USA

2.6. Sitographie

eXpérience Utilisateur. (s.d.) dans « User Experience is the way you experience the world, it's the way you experience your life, that's the way you experience the service, or yeah, an app or a computer system — But it's a system that's everything. » Repéré le 23 mars 2019

<http://bit.ly/don-norman-ux>

Facteurs humains. (s.d.) dans « Ergonomics (or human factors) is the scientific discipline concerned with the understanding of interactions among humans and other elements of a system, and the profession that applies theory, principles, data and methods to design in order to optimize human well-being and overall system performance ». Repéré le 17 mars 2019

<https://www.iea.cc/whats/index.html>

Empathy map. (s.d.) dans usabilis. Repéré le 16 mars 2019

<https://www.usabilis.com/empathy-map-carte-d-empathie-quest-dit-pense-ressent-l-utilisateur/> -

Interfaces tangibles. (s.d.) dans oatao. Repéré le 31 mars 2019

http://oatao.univ-toulouse.fr/18867/1/lepreux_18867.pdf

Invasif. (s.d.) dans Larousse. Repéré le 5 avril 2019

https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/invasif_invasive/44072

Perception. (s.d.) dans wikipedia. Repéré le 15 mai 2015

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Perception>

Nez électronique. (s.d.) dans neosepro. Repéré le 6 avril 2019

<https://neosepro.com/features/>

Nez électronique. (s.d.) dans cea-tech. Repéré le 6 avril 2019

<http://www.cea-tech.fr/cea-tech/Pages/a-propos-de-cea-tech/nos-reussites/aryballe-technologies.aspx>

Chapitre 3

Mise en réseaux

« Les ordinateurs, ces machines qui sans doute rendront paradoxalement à l'homme le sens de sa dignité et de sa liberté » Pierre Demarne et Max Roquerol

« Il ne sert à rien d'éprouver de beaux sentiments si l'on ne parvient pas à les communiquer. » Stefan Zweig

3. RESEAUX ET MISE EN PLACE DES DISPOSITIFS DE COMMUNICATION 173

3.1.	INTRODUCTION.....	173
3.2.	PLATE-FORME SANS FIL	174
3.2.1.	<i>Les capteurs – nos capteurs</i>	175
3.2.2.	<i>Les réseaux de capteurs sans fil</i>	179
3.3.	ARCHITECTURE SELECTIONNEE	195
3.3.1.	<i>Matériel</i>	196
3.3.2.	<i>Logiciel</i>	203
3.3.3.	<i>Fonctionnement</i>	205
3.4.	CONCLUSION.....	205
3.5.	BIBLIOGRAPHIE	207
3.6.	SITOGRAPHIE.....	209

3. Réseaux et mise en place des dispositifs de communication

3.1. Introduction

La micro-électronique et les communications sans fil connaissent un essor de par leur miniaturisation, leur coût en baisse, leurs faibles besoins en énergie.

Nous avons ainsi pu manipuler dans nos premières expérimentations des capteurs physiologiques de contact sans fil afin de nous extraire des enchevêtrements de fils même si la plate-forme expérimentale était fixe. Cela nous a donné de l'aisance. La collecte des données s'est faite par le biais d'une communication sans fil radio, d'un récepteur transférant les mesures recueillies des biocapteurs directement au PC ou aux sorties analogiques et également d'un convertisseur numérique-analogique. Ce matériel est décrit dans l'annexe 10 relative aux expérimentations initiales.

L'approche sans fil dans l'installation d'un jeu pervasif⁸⁸ s'impose. En effet, comme nous l'avons déjà mentionné, l'utilisateur se meut dans un lieu réel et aucune entrave ne doit le gêner, ni fil, ni dispositif invasif, pour une bonne attention et une meilleure immersion. Il s'avère que la communication entre les différents dispositifs et l'utilisateur doit être transparente et pratiquement invisible au sens de Mark Weiser (1991, 1996). Nous souhaitons de ce fait utiliser des ondes et, aussi, remplacer les capteurs physiologiques de contact par des matériels distants proposant les mêmes services dont la récupération des mêmes données.

Dans notre projet, plusieurs types de communications sont à considérer pour prendre en charge :

- La collecte des données physiologiques provenant de l'utilisateur et devant être stockées sur un disque pour analyse
- La collecte des actions du joueur pour le jeu
- L'envoi des feedbacks en fonction des collectes et analyses qui en résultent et du jeu.

Fondamentalement, nous devons disposer d'un réseau informatique sans fil assurant la communication entre l'ordinateur central, les différents capteurs interactifs, les dispositifs de captation des mesures physiologiques et le jeu.

⁸⁸ Voir le chapitre sur le jeu

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF ou WSN Wireless Sensor Network) répondent à l'absence de câblage, facilitent les déplacements et peuvent assurer la ou les communications requises.

Notre travail ne porte pas sur la mise en place de nouveaux réseaux de communication sans fil, il consiste à décrire ce que l'on peut utiliser pour réaliser notre plate-forme et notre prototype. Le réseau envisagé dans un premier temps reprend tout simplement des dispositifs faciles à acquérir et que nous avons déjà manipulés. Au-delà de la thèse, nous avons d'autres perspectives au vu des travaux sur l'ordonnancement et le routage menés par Lilia Lassouaoui (2018). Néanmoins, nous proposons de décrire la structure, l'architecture et les fonctionnalités du réseau sur lequel nous avons ébauché une approche afin d'offrir des interactions à distance quant à la collecte des données physiologiques, d'abord à partir de biocapteurs de contact puis de matériels distants, des actions du joueur et des retours de jeu. Les informations de base sur les réseaux ont été puisées de différents ouvrages et sites. On peut signaler les livres de Pujolle (2018), de Tanenbaum et Wetherall (2011) et de Servin (2013).

Ce chapitre a pour objectif de présenter différents types de capteurs ainsi que les réseaux sans fil disponibles de manière à concevoir notre plate-forme de communication et d'environnement. Notre sélection sera développée et s'orientera, pour conclure, vers des propositions formulées qui feront l'objet d'essais.

3.2. Plate-forme sans fil

Un réseau sans fil est un réseau informatique qui relie différents systèmes ou éléments en les interconnectant par des ondes. Notre système est composé de plusieurs dispositifs tels que capteurs physiologiques ou équivalents, capteurs tactiles, photodiodes, capteurs sonores, capteurs visuels, caméra, ordinateurs ... répartis dans un environnement clos et communicant. Nous nous plaçons dans un réseau dit personnel, car il couvre de faibles distances de l'ordre de quelques mètres, encore appelé WPAN pour Wireless Personal Area Network.

Pour information, le schéma ci-après montre ce que l'on appelle le spectre des ondes électromagnétiques. On peut voir sur cette figure que la plage de la lumière visible est très étroite et que plus on se déplace vers la droite, plus la fréquence augmente et plus la distance diminue, et inversement.

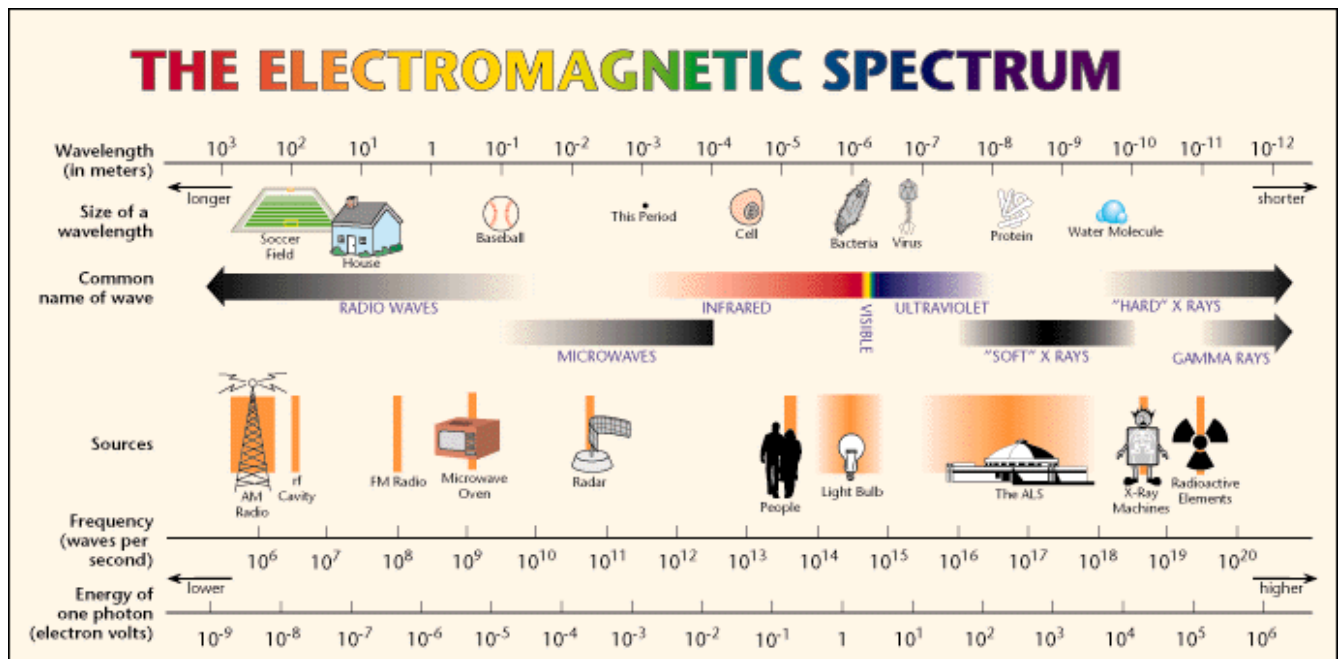


Figure 84 : Spectre des ondes électromagnétiques

<https://www2.lbl.gov/MicroWorlds/ALSTool/EMSpec/EMSpec2.html> - consulté le 26 janvier

2019

3.2.1. Les capteurs – nos capteurs

Il existe différents types de capteurs. Nous allons tout d'abord expliquer ce qu'est un capteur et ses caractéristiques avant de les présenter puis en quoi consiste un réseau de capteurs.

3.2.1.1. Généralités sur les capteurs

Un capteur est un dispositif capable d'acquérir des grandeurs physiques à mesurer (mesurandes : m) et de les transformer en grandeurs physiques exploitables (s) qui s'expriment de la façon suivante : $s=f(m)$ où f est la fonction qui caractérise le capteur. Il est le premier élément d'une chaîne d'acquisition et délivre un signal en sortie. La tendance actuelle est au développement de capteurs dits « intelligents » à microprocesseurs.

Un ensemble de critères usuels définit un capteur comme :

- la grandeur physique observée
- le temps de réponse
- la plage de mesures ou étendue de mesures qui se traduit par une valeur minimale et une valeur maximale

- la résolution qui est exprimée par la plus petite variation perceptible par le capteur
- la précision qui est la valeur la plus proche de la valeur vraie, celle que l'on cherche à mesurer
- la sensibilité qui représente le facteur de proportionnalité entre le signal de sortie et la grandeur mesurée
- la bande passante qui représente la gamme de fréquences pour laquelle fonctionne le capteur. Elle exprime la rapidité du capteur i.e. sa capacité de réponse aux variations du mesurande au cours du temps
- la linéarité qui signifie que les valeurs de sortie sont proportionnelles aux valeurs d'entrée
- la fidélité qui montre qu'on obtient les mêmes résultats pour les mêmes détections
- l'hystérésis qui correspond au retard de l'effet sur la cause (le résultat dépend de la mesure précédente).

D'autres caractéristiques font partie également du choix d'un capteur comme l'encombrement, le coût, la consommation et la facilité de mise en œuvre.

La figure ci-dessous explique le fonctionnement d'un capteur en présentant la chaîne d'information d'un système, la chaîne d'acquisition, de traitement et de communication.

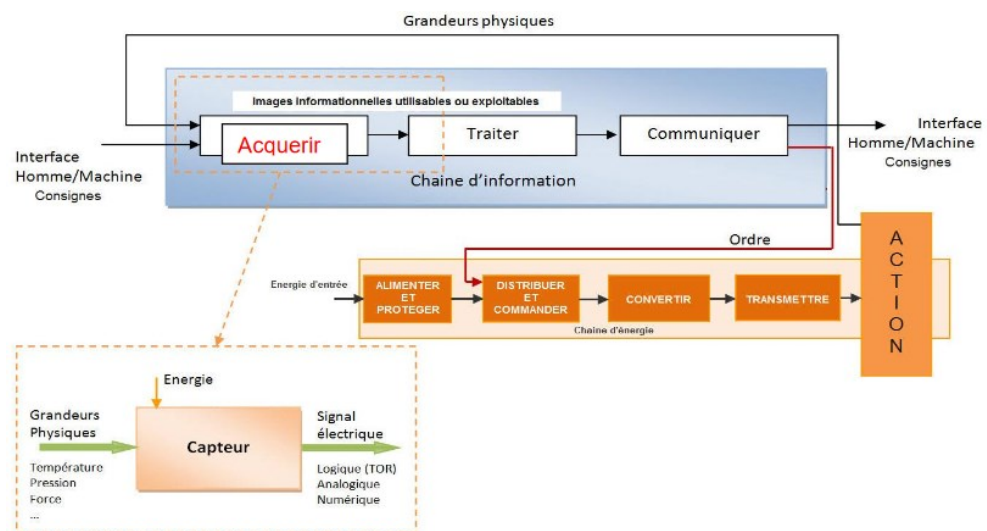


Figure 85 : Fonctionnement d'un capteur sur toute la chaîne

http://lgt.garnier.free.fr/espace_ee_fichiers/capteurs/capteurs.pdf - consulté 21 juillet 2017

Il y a deux grandes familles de capteurs : les capteurs passifs et les capteurs actifs. Les premiers ont besoin d'une énergie extérieure pour fonctionner, l'application d'une tension pour donner un signal de sortie. Leur modélisation est obtenue par l'impédance équivalente à la résistance dans un circuit électrique à courant continu. Suivant les mesurandes, les effets nécessaires à la mesure sont mentionnés dans le tableau suivant :

MESURANDE	EFFET UTILISE (Grandeur de sortie)	MATERIAUX
Température	Résistivité	Platine, nickel, cuivre, semi-conducteurs.
Très basse température	Constante diélectrique	Verre
Flux optique	Résistivité	Semi-conducteurs
Déformation	Résistivité Perméabilité	Alliages nickel Alliages ferromagnétiques
Position	Résistivité	Magnétorésistances : Bismuth, antimoine d'indium
Humidité	Résistivité	Chlorure de lithium

Tableau 8 : Capteurs passifs

http://lgt.garnier.free.fr/espace_ee_fichiers/capteurs/capteurs.pdf - consulté le 10 novembre 2018

Les seconds transforment directement les captations en grandeur électrique. Leur sortie est assimilée à un générateur et correspond à une différence de potentiel. Ces capteurs sont décrits comme des dipôles actifs pouvant être de type courant, tension ou charge électrique.

Le tableau suivant illustre les effets utilisés en fonction des mesurandes.

MESURANDE	EFFET UTILISE	GRANDEUR DE SORTIE
Température	Thermoélectricité (thermocouple)	Tension
Flux optique	Photoémission Pyroélectricité	Courant Charge
Force, pression, accélération	Piézoélectricité	Tension
Position	Effet Hall	Tension
Vitesse	Induction	Tension

Tableau 9 : Capteurs actifs

http://lgt.garnier.free.fr/espace_ee_fichiers/capteurs/capteurs.pdf - consulté le 10 novembre 2018

Nous ne présenterons pas la constitution d'un détecteur, ni les différentes informations transmises par les capteurs ni la représentation des signaux. Pour plus d'informations on pourra consulter Bissieres (2008) et Asch (2017).

Sans entrer dans le détail du signal, les capteurs sont classés par le type de signal transmis. Ainsi, les capteurs très répandus en automatisation sont les capteurs à signal tout ou rien appelé TOR. Ce signal est binaire. En général, ces capteurs sont appelés détecteurs. Ils sont utilisés par exemple dans les détections de position pour un interrupteur. Les capteurs à signal analogique traduisent des valeurs de température, de pression, de position ... Le signal varie dans ce cas entre deux valeurs limites. Quant aux capteurs à signal numérique, ils produisent des signaux qui sont la combinaison de bits. Baudouin et Lavabre (2007) proposent une exploration rapide d'un ensemble de dispositifs et de leur utilisation. C'est un bon ouvrage pour les non spécialistes et constitue une bonne approche quant aux choix et solutions.

Les catégories de capteurs seront abordées car elles permettent d'appréhender ceux qui ont été ou seront utilisés pour le projet. Il est distingué les capteurs avec ou sans contact dans lesquels on trouve la détection électromécanique et les codeurs optiques.

Les capteurs avec contact nécessitent un contact direct pour détecter et mesurer le phénomène recherché. Ce sont ceux dont nous nous sommes servis dans nos premières expériences et que nous souhaitons transposer ou remplacer. Alors que les capteurs sans contact travaillent à une certaine distance des phénomènes pour les détecter et les mesurer.

Les capteurs recensés sont nombreux et nous n'en présentons qu'un petit échantillon :

- Les capteurs inductifs jouent sur le champ magnétique. Lorsqu'un objet entre dans leur champ, il se produit une perturbation de ce champ que l'on peut mesurer.
- Les capteurs de sons sont utilisés dans les microphones ou bien encore dans les hydrophones.
- Les capteurs de courant, comme le capteur à effet Hall, produit une tension représentant le courant à mesurer ou à visualiser.
- Les capteurs piézo-électriques, qui se polarisent électriquement sous l'action d'un effet mécanique et se déforment sous l'action d'un effet électrique ; à corde vibrante, qui mesurent les variations d'allongement ; baromètres, qui mesurent la pression atmosphérique ... sont des capteurs de pression.
- Les capteurs composés d'un émetteur de lumière associé à un récepteur sont des capteurs photoélectriques ou optiques où la détection se fait par coupure du faisceau lumineux. Les cellules photoélectriques, les photodiodes ... font partie des capteurs de lumière.
- Les thermomètres, les thermistances, les thermocouples, les pyromètres ... appartiennent à la famille des capteurs de température.

3.2.1.2. Les capteurs utilisés et pressentis

Nous avons utilisé des capteurs physiologiques lors de nos expérimentations. Il s'agit de capteurs de contact. Par exemples, un capteur de type corde vibrante a été exploité pour la mesure de la fréquence respiratoire nous permettant d'obtenir des valeurs d'allongement lors de l'inspire et de relâchement à l'expire ou encore un capteur de type température afin de mesurer les variations thermiques à la surface de la peau. Nous envisageons dans notre jeu d'employer différents types de capteurs ou dispositifs, pour remplacer les capteurs de contact mesurant les variables physiologiques, pour les stimuli générés par le jeu tels que des feedbacks visuels, sonores et tactiles ou encore correspondant aux actions du joueur ainsi que ceux entrant dans la composition du réseau servant aux communications. Comme nous l'avons déjà mentionné, nous utiliserons en particulier des dispositifs à base d'ondes.

La liaison entre tous nos dispositifs nécessite la mise en place d'un réseau de communications. Nous allons aborder le sujet afin de montrer qu'en fonction des objectifs attendus et des contraintes liées à l'étude, le choix des techniques est aussi une étape à part entière.

3.2.2. Les réseaux de capteurs sans fil

Un réseau est un ensemble d'entités interconnectées communicant. A cela, il est possible d'ajouter des caractéristiques comme le fait que la communication s'effectue par le biais d'ondes de rayons de différentes portées. Les échanges répondent à des règles matérielles et/ou logicielles précises. Les dispositifs pouvant généralement évoluer dans un environnement sans fil sont par exemple les capteurs sans fil, les drones, les smartphones, les objets connectés ou encore les étiquettes intelligentes.

L'interconnexion de capteurs sans fil autorise la mobilité. De nombreuses applications sont mises en œuvre dans plusieurs domaines : militaire (surveillance des mouvements de l'ennemi, détection de mines ou de matières chimiques ...), agricole (gestion optimale des procédés, des terrains ...), environnemental (détection de fuites toxiques, aléas météorologiques ...), médical (surveillance des paramètres vitaux, de la glycémie ...), domotique (détection de présence, manipulation et surveillance du chauffage, contenu du réfrigérateur ...), commercial (suivi de marchandises, de stock ...) et qui se retrouvent dans l'Internet des Objets, IdO (IoT – Internet of Things)⁸⁹. Nous nous sommes inspirés des différents secteurs et, bien sûr, en priorité, du domaine médical en ce qui concerne les mesures physiologiques. Nous pouvons d'ailleurs citer Noury (2009) qui réalise

⁸⁹<https://www.objetconnecte.net/histoire-definitions-objet-connecte/> - consulté le 16 janvier 2019 - donne une explication succincte de l'histoire et des définitions relatives aux objets connectés.

une synthèse sur les techniques de télé-monitorage médical (capteurs, algorithmes et réseaux) mais sans interaction. Il s'agit d'observations.

3.2.2.1. Positionnement et définition

Nous avons besoin tout au long de l'expérience du jeu non seulement de surveiller, de détecter, de mesurer des paramètres divers mais aussi de transmettre ces informations à une unité de calcul centrale pour traitement puis, de renvoyer, si nécessaire, un message sous différentes formes au joueur. Ces informations transitent par un système de communication sans fil pour les principes évoqués plus avant. Pour l'instant le périmètre est limité à une pièce mais pourrait s'étendre à un ensemble de pièces voire davantage.

Un réseau de capteurs sans fil correspond donc bien à nos attentes sachant qu'un tel réseau est avant tout un réseau sans câble c'est-à-dire un moyen de communication radioélectrique où chaque équipement est distant de l'autre et dispose d'un moyen sans fil qui permet l'envoi et/ou la réception des signaux et des données. Il est défini comme un réseau de petits dispositifs que l'on appelle nœuds capteurs répartis dans l'espace ou environnement. Ils coopèrent et communiquent des informations collectées dans l'environnement, dans la zone d'intérêt. Les données sont envoyées de nœud en nœud à un collecteur ou un autre réseau. Un article de Rawat (2014) en fait un état assez complet.

Les réseaux sans fil ou WLAN (Wireless Local Area Network) fonctionnent sur la base de normes. La norme la plus connue est la norme Wifi (Wireless Fidelity) encore connue sous l'intitulé 802.11. Pour plus de détails sur les RCSF en général, il est possible de consulter Challal (2008) qui fait une synthèse de différentes applications. Trois propriétés émergent des RCSF : la facilité de déploiement, l'ubiquité de l'information et le coût réduit pour les installer. Nous présentons ci-après les structures de RCSF sur lesquelles nous pouvons nous appuyer pour le développement de notre recherche.

3.2.2.2. Présentation succincte du fonctionnement des RCSF et topologies

Le RCSF est composé de capteurs placés dans un environnement qui constitue une zone d'intérêt. Les capteurs employés sont fonction des besoins et de leurs propriétés.

Le schéma (figure 86) un peu plus loin illustre un exemple de réseau de capteurs sans fil classique avec différentes topologies : étoile (star), arbre (tree), maillé (mesh), et met en évidence la zone d'intérêt, les nœuds. Chaque nœud dispose de caractéristiques qui en font un nœud coordinateur,

un nœud routeur ou un nœud terminal encore appelé feuille. Le rôle du coordinateur est la gestion du réseau. Il connaît la composition du réseau. Il dispose de toutes les fonctionnalités comme celle de routage. Le routage correspond au meilleur chemin dans le réseau d'une source vers une destination, pour transmettre, transporter les messages, via des nœuds intermédiaires soit en point à point (P2P), en point à multipoint (P2M), en multipoint à point (M2P) ou multipoint à multipoint (M2M) à l'aide de différents types de protocoles pouvant être proactifs, réactifs ou hybrides. Le coordinateur doit fonctionner durant toute la durée de vie du réseau. Il faut donc prévoir une alimentation suffisante. Le routeur a pour rôle, comme son nom l'indique, le routage. Il permet également d'étendre le réseau. Le terminal ou encore feuille, quant à lui, a aussi sa propre fonctionnalité. C'est une entité simple comme par exemple un capteur ou un actionneur. Ce nœud terminal est actif par le changement d'état des modules lui étant attachés ou sur réponse à une sollicitation venue du réseau. Il ne nécessite pas de beaucoup d'énergie. Souvent les routeurs, tout comme les feuilles, peuvent être mis en veille pour une optimisation de la consommation d'énergie.

Il est possible d'utiliser une des topologies ou bien de les combiner selon les besoins. Le paragraphe 3.2.2.3 exprime les moyens pouvant être mis en œuvre.

Un nœud capteur (dit « mote » en anglais) comprend :

- Une unité d'acquisition par laquelle sont collectées les mesures. Un convertisseur analogique numérique est associé au capteur pour former cette unité.
- Une unité de traitement qui contrôle les communications avec d'autres nœuds et exécute les protocoles. Elle est munie d'un processeur qui gère l'acquisition et le stockage des données.
- Une unité de communication qui comprend un émetteur-récepteur de type optique ou radio qui permet la communication entre les différents nœuds.
- Une unité d'énergie qui alimente les capteurs et a un impact sur la durée de vie de ceux-ci.

L'image ci-après montre l'architecture générale d'un nœud capteur.

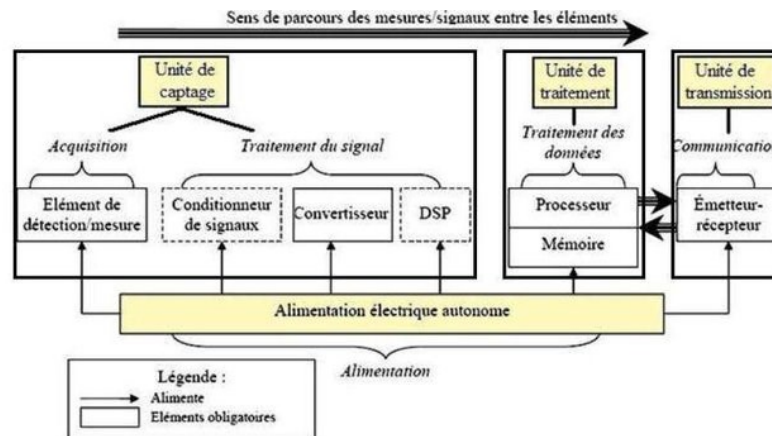


Figure 86 : Structure générale d'un nœud capteur

https://www.researchgate.net/publication/275027616_Supervision_de_l%27operation_d%27irrigation_des_arbres_fruitiers_a_l%27aide_des_reseaux_de_capteurs_sans_fil/figures?lo=1 –

consulté le 27 janvier 2019

Le schéma suivant est inspiré de <https://wapiti.telecom-lille.fr/commun/ens/peda/options/st/rio/pub/exposes/exposesrio2006/descharles-waia/network.htm> et complété. Il représente un modèle de réseau de capteurs sans fil.

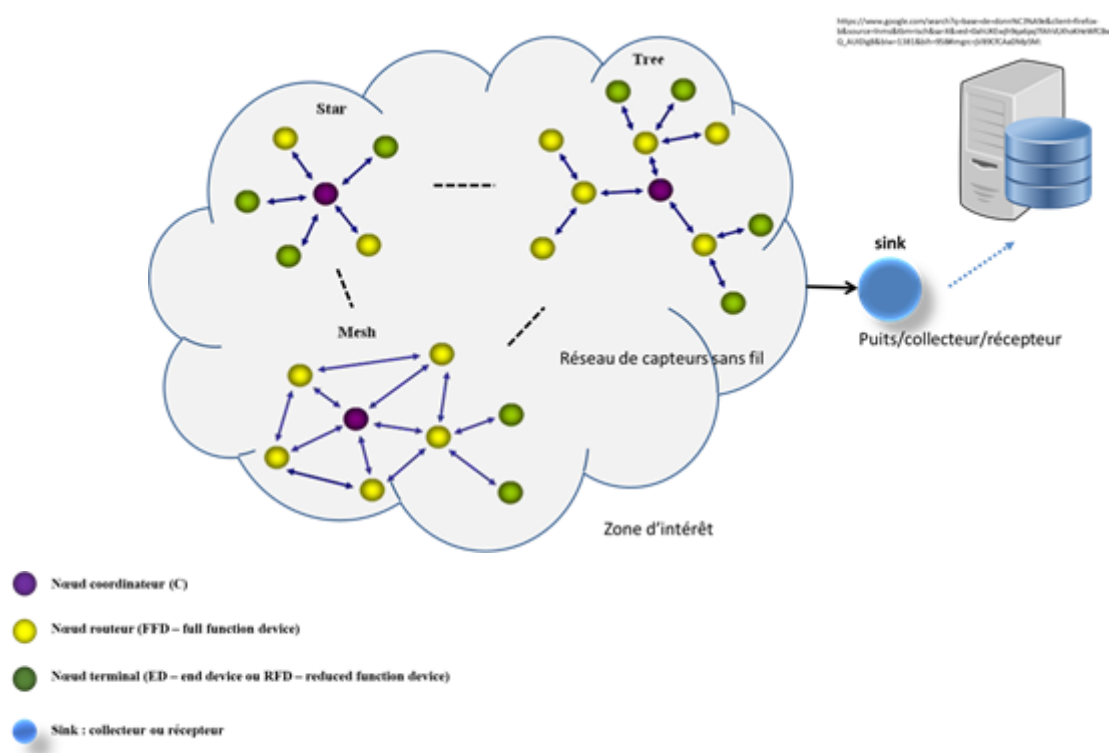
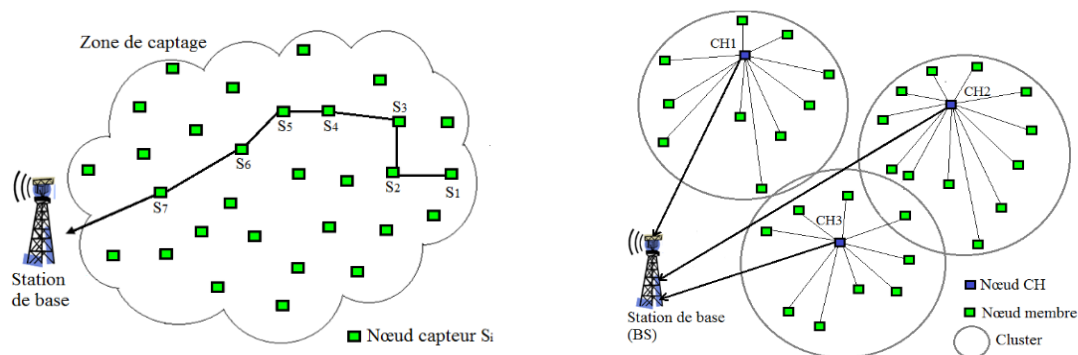


Figure 87 : Exemple de réseaux de capteurs sans fil

3.2.2.3. Architectures, protocoles et piles de communication

Les architectures des RCSF dépendent des applications déployées et des choix des techniques retenues. Il existe deux types d'architectures présentées par Ngom (2016), Koné (2011) et dans la littérature : à plat où l'on déploie les protocoles de communication adaptés et hiérarchique à savoir auto-organisée avec des formations en clusters et un support efficace pour une grande variété de protocoles de routage, de localisation, de services... Challal (2016) montre également les architectures et applications dans la partie II de son document portant sur les RCSF.

La figure ci-après est un exemple extrait de Ngom (2016) et illustre les architectures à plat et hiérarchique.



Exemple d'un RCSF fonctionnant selon un mode d'architecture à plat Exemple d'un RCSF fonctionnant selon une architecture hiérarchique en clusters

Figure 88 : Architectures à plat et hiérarchique

Un modèle en couches est également utilisé pour la communication dans les RCSF comme dans le modèle en couches de l'OSI (Open Systems Interconnection). Nous présentons succinctement ce modèle. Il est représenté par la figure 89 et, comme indiqué, fait apparaître sept couches de la plus basse (couche 1), la couche physique, à la plus haute (couche 7) la couche application. Chaque couche a des fonctionnalités liées aux différents protocoles et services gérés. Les protocoles sont normalisés par des instances. On trouve les normes IEEE définies par l'Institute of Electric and Electronics Engineering (IEEE), l'Internet Engineering Task Force (IETF) publie les « Requests For Comments » (RFC) i.e. détaille les aspects techniques et donne des recommandations. Il y a bien sûr aussi l'International Standards Organization (ISO) qui définit les normes ISO.

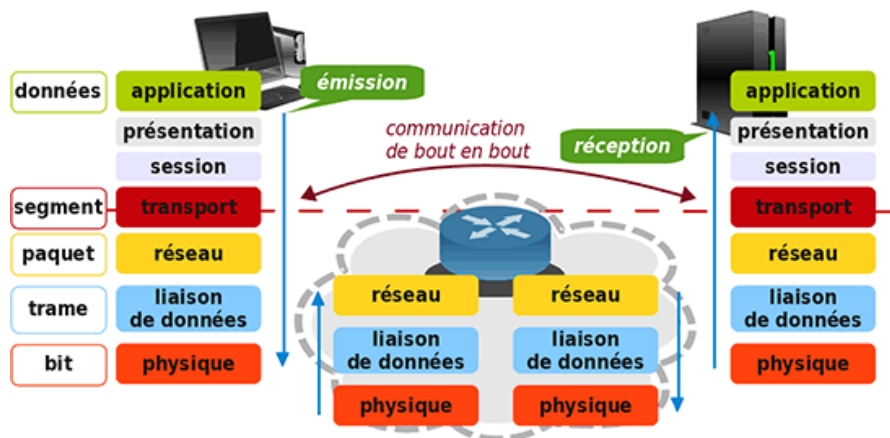
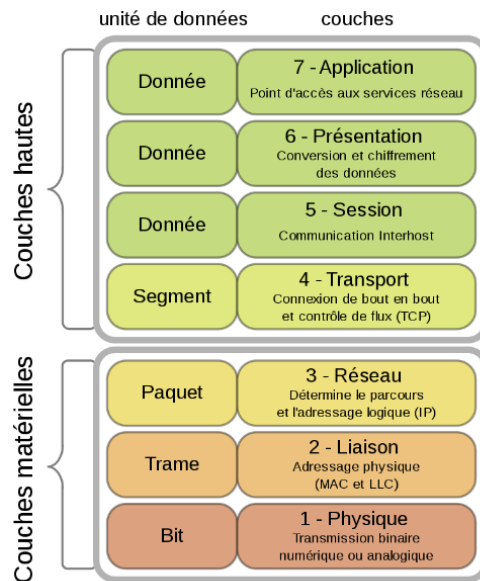


Figure 89 : Le modèle OSI – son fonctionnement

https://fr.wikibooks.org/wiki/Les_r%C3%A9seaux_informatiques/Les_mod%C3%A8les_OSI_et_TCP – <http://www.coursnet.com/2014/12/cours-modele-osi.html> consultés le 15 janvier 2019

Les messages transitent par différentes couches ou niveaux et sont nommés différemment selon le niveau. Par exemple, au niveau des couches 7 à 5, on parle de données ou data ou messages, de segments ou datagrammes au niveau de la couche 4 transport alors qu'au niveau de la couche 3 réseau, il s'agit de paquet et de bits au niveau de la couche 1 physique. La figure 89 montre les dénominations. Une couche ne peut dialoguer qu'avec une couche équivalente (dite paire).

L'architecture protocolaire pour les RCSF est un peu différente et comporte cinq couches (voir figure ci-après) : les couches application, transport, réseau, liaison et physique auxquelles on rajoute la gestion de l'énergie, la gestion de la mobilité et la gestion des tâches.

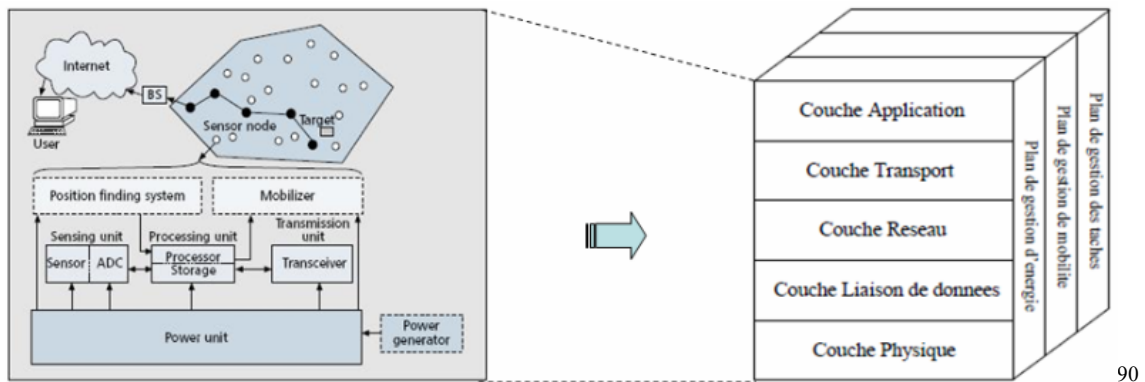


Figure 90 : pile protocolaire d'un réseau de capteurs sans fil

Le modèle OSI est parfois modifié pour des questions d'optimisation et d'énergie, comme nous le verrons plus loin. Ngom (2016) l'introduit dans sa thèse.

Les protocoles et réseaux sont différents selon leur utilisation, selon le périmètre géographique que l'on souhaite couvrir. Nous nous intéressons aux normes IEEE 802 qui concernent les réseaux filaires et sans fil, locaux (LAN – local area network) et métropolitain (MAN – metropolitan area network). Les services et définitions s'y référant se rapportent aux couches basses du modèle OSI à savoir la couche physique et la couche liaison de données. Pour la partie sans fil, qui nous concerne, sont utilisés IEEE 802.11 mais aussi 802.15, qui se décompose en sous normes, plutôt employé pour les réseaux privés et, 802.16 et 802.20 exploités pour les réseaux large bande c'est-à-dire capables d'acheminer de très grands débits d'informations. On peut citer aussi 802.22 qui se situe au niveau des réseaux régionaux. L'ouvrage de Pujolle (2018) apporte les connaissances théoriques utiles à une plus large compréhension de ces technologies.

802.11 est un ensemble répandu de normes puisqu'elles se rapportent, entre autres, au Wi-Fi (Wireless Fidelity). En quelques mots, le Wi-Fi, très utilisé pour les postes nomades, dispose d'une large bande passante mais est consommateur d'énergie. Le wifi 802.11 (a/b/g/n/ac) est décliné sous plusieurs protocoles, le dernier en date est la version 802.11ac qui porte sur des fréquences de 5 à 6 Ghz environ, une largeur de bande de 20 à 160 Mhz, un taux de transfert variant de 433 à 1 300 Mbit/s et une distance allant de 20 à 50 mètres. Un nouveau protocole 802.11ax prévu fin 2018 dispose de fréquences variant de 2.4 à 5 Ghz et d'un taux de transfert de 10,53 Gbit/s. Un

⁹⁰ <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/11776/1/Ms.Tel.Merabet%2BZiani.pdf> – consulté le 18 octobre 2019

groupe de travail IEEE 802 fait évoluer les normes de cet ensemble de protocoles dont le calendrier est consultable à l'adresse⁹¹.

Le 802.11 est préconisé pour le transfert de données à haut débit. Sa portée couvre des dizaines de mètres.

Un autre protocole bas niveau (couches 1 – 2) est le protocole **802.15.4**. Les piles de communications classiques n'étant pas adaptées aux RCSF, il a été développé des normes pour répondre aux systèmes sans fil de faibles capacités et de basse consommation d'énergie. Il constitue une base pour d'autres protocoles comme Zigbee ou 6LowPan. La radio est un domaine où ce protocole est très utilisé en partie pour son débit faible et surtout pour sa faible consommation et une faible perte de propagation. La couche physique dispose d'un émetteur/récepteur radio contrôlant la qualité du signal, la détection d'énergie et l'accès au média. Le protocole 802.15.4 est présenté un peu plus en détail dans le paragraphe 3.2.2.4 du fait de notre intérêt pour ses propriétés.

Aux mêmes niveaux (mêmes couches), on peut citer :

- **LoRa** (Long Range) disposant d'une couverture pouvant atteindre plusieurs kilomètres suivant l'environnement et définissant sa propre technique de modulation,
- **RFID** (Radio Frequency IDentification) tout comme **NFC** (Near Field Communication ou communication en champ proche) de très courte portée fonctionnent grâce à la présence de deux dispositifs : un marqueur possédant une puce électronique et une antenne et, un lecteur fournissant, sans contact, l'énergie aux marqueurs pour l'initialisation de la communication. Ce sont des moyens de communication sans fil entre deux dispositifs compatibles et capables de transmettre des données. Leur débit peut atteindre les 424 Kbit/s. Leur portée est de quelques centimètres. Ce sont ces technologies que l'on trouve dans les radio-étiquettes, le paiement sans contact ou l'accès à du contenu exclusif.
- **Bluetooth**, bien connu, est également un protocole de communication sans fil de bas niveau qui repose sur le 802.15.1 et a une portée allant de quelques mètres à une centaine de mètres. La portée de Bluetooth 5.0 est de 200 mètres, la bande de fréquence de 2.4 Ghz. Cette nouvelle version permet de multiplier par 4 le débit des transmissions basse consommation (4 Mbit/s). On le trouve dans de nombreux appareils comme les téléphones, les ordinateurs ... Il permet la connexion de deux dispositifs sans nouvelle authentification dès lors que celle-ci a été initiée une première fois. L'introduction de cette technologie dans le monde de l'IoT ou IdO a vraiment démarré avec la version 4.0 appelée Bluetooth

⁹¹ http://www.ieee802.org/11/Reports/802.11_Timelines.htm (consulté le 16 janvier 2019), tenu par McCann et Ashley.

smart qui a amené au Bluetooth Low Energy (BLE). Bluetooth smart anciennement Wibree est un Bluetooth à basse consommation qui complète la technologie Bluetooth avec les mêmes ordres de grandeurs de débit mais une consommation dix fois moins importante. Cela permet de l'intégrer dans des bracelets, des montres, des petits capteurs ... Le Beacon est une balise BLE de petite taille permettant la géolocalisation des objets. Il peut être utilisé en mobilité ou non et définir des zones. Le Bluetooth standard a un niveau d'émission plus élevé et une portée plus large. Ces techniques se complètent.

Parmi les protocoles de la couche 3, il y a **IPv4/IPv6**, **6LowPAN** et **Zigbee**. Il s'agit de la couche chargée des services d'adressage et du routage inter-réseaux. Les deux premiers concernent les communications inter-ordinateurs mais aussi les réseaux d'objets connectés. Le Zigbee est un protocole de communication sans fil. Nous en parlerons plus en détail dans la partie 3.2.2.5 car nous avons commencé à utiliser cette technique dans notre projet. En ce qui concerne IPv4 et IPv6, les RFC 791 et 2460, auxquelles on pourra se référer, décrivent les spécifications, cadre et fonctionnement des protocoles. 6LowPAN vient de « IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Network ». Il a été créé, pour les besoins, une fragmentation des paquets IPv6 sur les réseaux reposant sur 802.15.4. En effet, 802.15.4 limite la taille des trames d'où la nécessité de découper les paquets. 6LowPAN gère aussi d'autres fonctionnalités comme le routage relatif à des dispositifs à faibles ressources ou la compression de l'entête IPv6. Deux RFC, 4919 et 4944, récapitulent les principales possibilités de 6LowPAN.

Ensuite, les protocoles applicatifs de la couche 7 sont nombreux. Dans le cadre des objets connectés, on peut citer :

- **CoAP** (Constrained Application Protocol) est standardisé. Il repose sur une couche UDP (User Datagram Protocol) un protocole simple utilisé par Internet et sans contrôle d'erreurs. Il fait le lien avec les applications HTTP (Hyper Transfert Protocol). HTTP est un protocole de communication client-serveur pour le world wide web (WWW). Ce protocole est développé au niveau application donc il ne dépend pas de l'architecture matérielle.
- **XMPP** (eXtensible Messaging and Presence Protocol) est un protocole de messagerie surtout utilisé à l'origine pour la messagerie instantanée (Jaber) et il est surtout développé aujourd'hui pour l'IoT.
- **MQTT** (Message Queuing Telemetry Transport) fonctionne au-dessus de TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol, protocole de transport fiable) et nécessite un serveur pour la centralisation des données. C'est un mécanisme de publication

et d'abonnement de messages. Une variante gère les réseaux de capteurs avec l'utilisation d'UDP.

- **SSI** (Simple Sensor Interface) permet l'échange simple des données dans un réseau de capteurs au-dessus d'une liaison série UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter), soit en point à point ou sur des protocoles réseau nanoIP (nano Internet Protocol) ou TCP/IP par le biais d'une librairie. Les UART sont souvent intégrés dans des composants comme les microcontrôleurs.

Il existe aussi des protocoles multi-couches, couvrant tout ou partie des couches, souvent au format propriétaire, payants, ou d'origine militaire vendus sous forme de kits :

- **MiWi** qui s'appuie sur la norme 802.15.4 est un protocole de communication sans fil propriétaire de Microchip Technology. Il fonctionne sur la base de signaux radio de basse puissance.
- **Zwave** est aussi un protocole propriétaire, développé par Zensys. Ce protocole de communication radio est de faible puissance. Il dispose d'une fréquence de 868 Mhz. Il est utilisé en domotique. Sa portée est de 50 mètres environ. Le protocole permet l'interopérabilité des dispositifs. En effet, ceux-ci peuvent communiquer à partir du moment où ils se situent dans le réseau Z-Wave.
- **Ant+** est un protocole de communication sans fil propriétaire qui utilise la bande de fréquence de 2.4 Ghz. Il consomme peu d'énergie et est appliqué dans les applications liées aux capteurs de santé, de sport ou en domotique et dans l'industrie.
- **Dash7** est un protocole de communication sans fil développé pour les militaires. Sa portée est d'un kilomètre. La Dash7 Alliance cherche à le promouvoir dans le domaine des objets connectés.
- **Thread** est quant à lui un protocole gratuit M2M (machine to machine), open source. Sa pile repose, selon les couches, sur 802.15.4, IPv6 et 6LowPAN, UDP. Thread propose un réseau dédié pour connecter différents objets dans une maison dite intelligente, par exemple. En domotique, il existerait une relation émergente entre Thread et Zigbee pour une interopérabilité universelle.

Alexis Lothoré nous offre un schéma dans un abrégé consacré aux technologies embarquées qui résume assez bien un grand nombre de protocoles pour les objets connectés par rapport au modèle OSI. Il est intégré ci-dessous.

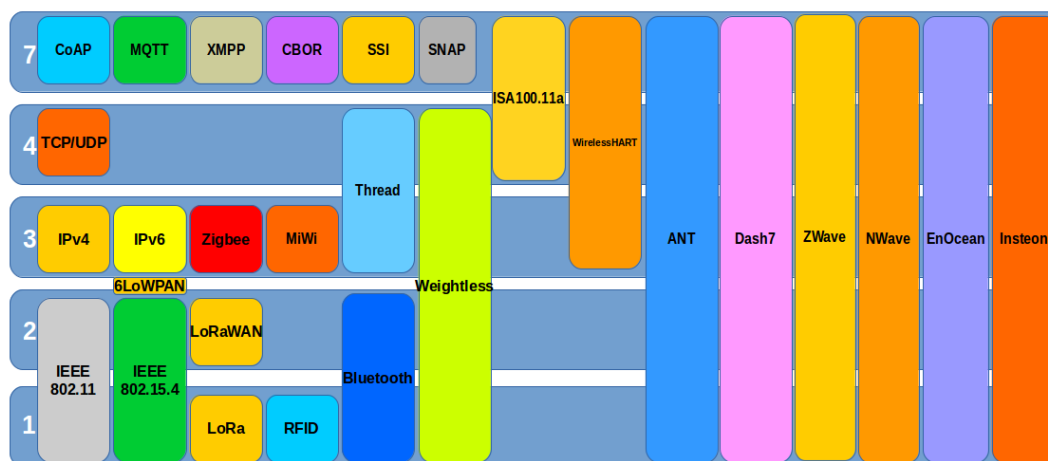


Figure 90 : Technologies embarquées et protocoles

<http://www.linuxembedded.fr/2016/03/protocoles-de-communication-frameworks-et-systemes-dexploitation-pour-les-objets-connectes/> - consulté le 13 janvier 2019

Nous terminerons par des réseaux prêts à l'emploi nécessitant un abonnement et les réseaux mobiles proposés par les fournisseurs habituels portant un intérêt prononcé pour l'internet des objets qui développent des offres réseaux pour des applications machine à machine (M2M).

- **SIGFOX** est un réseau permettant de récupérer facilement des données. C'est un système utilisant des fréquences radio très rapides et de longues portées.
- **QOWISIO** est un peu similaire au précédent et propose en plus un déploiement de solutions demandées par les clients.
- **The Things Network** est le premier réseau ouvert de données fonctionnant sur LoRaWAN.

Le schéma suivant exprime le débit nominal, la couverture, la consommation d'énergie pour quelques-uns des protocoles.

Nous constatons sur ce schéma que le Wi-Fi et la téléphonie mobile 4G sont des techniques très consommatrices d'énergie avec les débits les plus élevés. La 5G, non indiquée sur la figure, offre davantage d'intelligence en cela qu'elle est la technologie émergente de l'IoT avec la capacité de gérer un nombre élevé de connexions, une plus grande rapidité (100 fois plus que la 4G) et de la performance (10 fois moins de latence que la 4G). Les technologies Sigfox et OnRamp, devenu Ingenu, sont les moins consommatrices avec en contrepartie des débits plus faibles. Ingenu est un exemple de réseau de machines IoT. Il a été déployé dans la ville de San Diego pour gérer l'éclairage public, les déchets, l'eau, la surveillance de l'environnement...

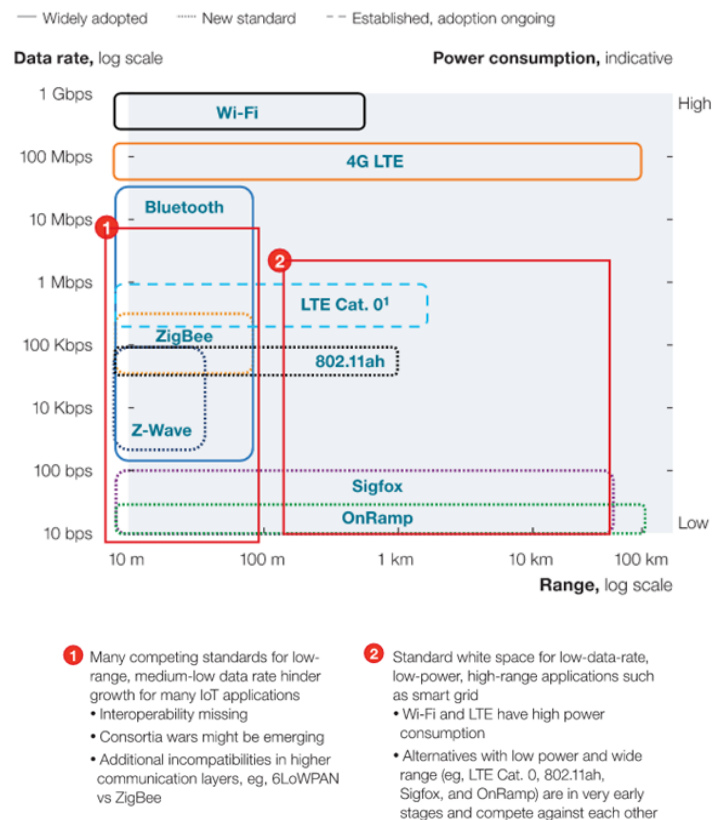


Figure 91 : Consommation et distance

<https://heatzy.com/blog/25/8/2017/domotique-les-protocoles-pour-connecter-vos-objets-connects>
- consulté le 16 janvier 2019

Comme le montre la figure ci-après, un nombre important de types de réseaux et technologies sans fil s'offre à nous. Pour choisir, il est indispensable de se poser les bonnes questions quant à la mise en place d'une application, d'un projet, d'un réseau d'objets connectés personnel...

Que choisir ?

Notre choix s'est porté sur des technologies, de préférence, open source, économiques, ne nécessitant pas de longue portée et capables de transporter nos données. Ce sont les raisons pour lesquelles nous présentons brièvement dans la suite les normes IEEE 802.15.4 et Zigbee. Ces normes ont été élaborées pour standardiser les systèmes sans fil à faible capacité.

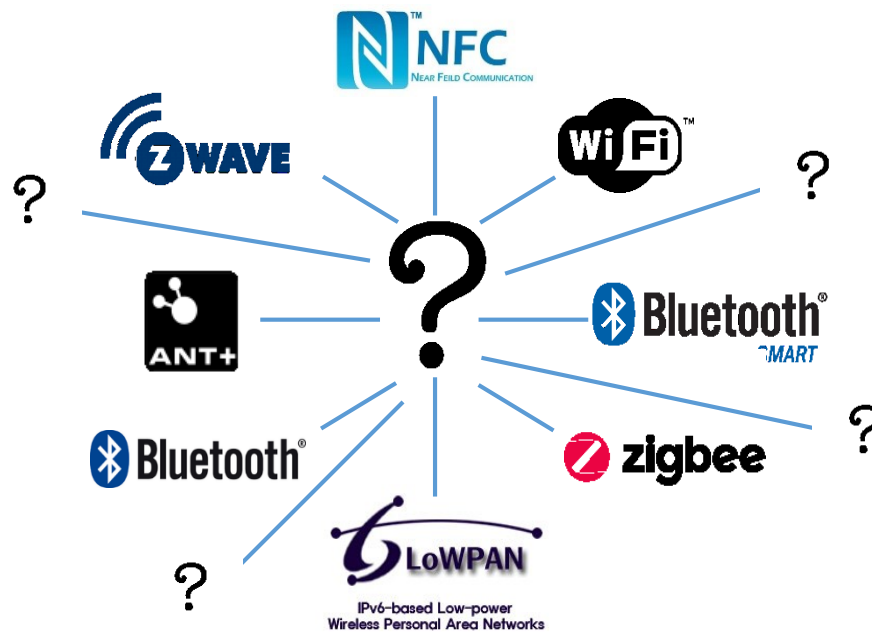


Figure 92 : Réseaux sans fil

Figure élaborée sur la base du schéma <http://www.wi6labs.com/2016/03/16/quelle-technologie-radio-pour-les-objets-connectes-premiere-partie/> (consulté le 6 février 2017) augmenté par nos soins

Ce domaine des RCSF fait l'objet d'un grand intérêt dans de nombreux secteurs. Les travaux de recherche sont multiples et récents, que ce soit des communications dans des congrès ou des thèses de doctorat. Les archives hal⁹² le montrent.

Nous recherchons un moyen facile à installer, à déployer et économique en matière d'énergie tout en étant capable d'acheminer toutes les informations physiologiques, événementielles et régulateurs.

Les réseaux de capteurs sans fil sont capables de générer et d'échanger des données de façon autonome et de manière transparente. Leur technologie facilite leur embarquement et leur omniprésence. Il est aussi important de pouvoir ajouter ou retirer un dispositif sans que la plateforme ne subisse un arrêt. La technologie Zigbee a attiré toute notre attention car nous nous en étions déjà servie dans le projet PLUG. Elle avait été satisfaisante dans ce contexte. Notre étude est un peu différente et l'architecture n'est pas complètement définitive puisque la plateforme n'est pas finalisée. Nos choix peuvent donc encore évoluer selon les retours qui nous seront faits

⁹²https://hal.archives-ouvertes.fr/search/index/?q=r%C3%A9seau+capteurs&submit=&docType_s=ART+OR+COMM+OR+OUV+OR+COUV+OR+DOUV+OR+REPORT+OR+OTHER+OR+THESE+OR+HDR+OR+LECTURE+OR+UNDEFINED&submitType_s=file»

par les experts du domaine. Rappelons que nous avons trois types de communications à considérer et satisfaire, comme indiqué dans l'introduction.

Les parties ci-dessous sont l'occasion d'introduire de façon un peu plus poussée les techniques sur lesquelles reposent nos systèmes de communications à partir de modules Xbee certifiés par Zigbee Alliance.

3.2.2.4. 802.15.4

Le 802.15.4 est un protocole de communication radio pour les réseaux sans fil personnel à faible portée, faible consommation et faible débit. C'est la famille des Low Rate Wireless Personal Area Network (LR WPAN). Il y a deux types de dispositifs : ceux qui disposent de toutes les fonctionnalités (FFD – full function device) et ceux à fonctions limitées (RFD – reduced function device). Un FFD peut être coordinateur, routeur ou dispositif terminal (end device) ou feuille. Le RFD est le dispositif terminal. Celui-ci peut informer sur l'état du capteur, contrôler l'activation d'un dispositif de mouvement. Il est essentiel que les FFD et les RFD utilisent le même canal radio pour communiquer sachant que les RFD ne communiquent qu'avec un FFD et qu'un FFD communique aussi bien avec des FFD que des RFD.

IEEE 802.15.4 spécifie deux couches : la couche physique et la couche de contrôle d'accès au médium de communication (MAC, Medium Access Control).

Selon ⁹³ et Challal (2008), la couche MAC IEEE 802.15.4 :

- Utilise deux modes d'adressage IEEE 64-bits et 16-bits
- A un accès canal CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) qui est une méthode d'accès au média⁹⁴
- Utilise une structure de trame simple
- Permet d'utiliser le mécanisme de beaconing (mécanisme de géorepérage à des fins de fourniture de contenus adaptés), réveil périodique, vérification de l'arrivée d'un beacon (petit boîtier capteur capable de dialoguer avec des smartphones par exemple, principalement grâce à la technologie bluetooth, BLE)
- Economise l'énergie à travers la mise en veille entre deux beacons et, les nœuds ne devant pas router ou recevoir les données aléatoirement peuvent se mettre en veille

⁹³ <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/04/15-04-0218-01-004a-ieee802-15-4-mac-overview.ppt> - consulté le 27 janvier 2019.

⁹⁴ Dans la norme 802.11, il y a deux sous-couches : la couche de contrôle de liaison logique (Logical Link Control, LLC) et la couche de contrôle d'accès au support (Media Access Control, MAC). La couche MAC utilise CSMA-CA et la technique PCF (Point coordinated Function) pour communiquer avec une station à l'écoute.

- Assure une transmission fiable de données
- Offre une sécurité AES-128(Advanced Encryption Standard) qui est un algorithme de chiffrement sur 128 bits

3.2.2.5. ZigBee

La technologie ZigBee est une technologie réseau sans fil LP-WPAN (Low Power -Wireless Personal Area Network). Elle est constituée d'un ensemble de protocoles de hauts niveaux et est fondée sur le standard IEEE 802.15.4. La ZigBee Alliance a défini les couches du routage à l'application. Le routage est essentiel à la transmission des informations. Selon les caractéristiques souhaitées quant à la bonne réception des données, il est privilégié tel ou tel protocole.

Le schéma ci-dessous illustre la pile de protocoles ZigBee.

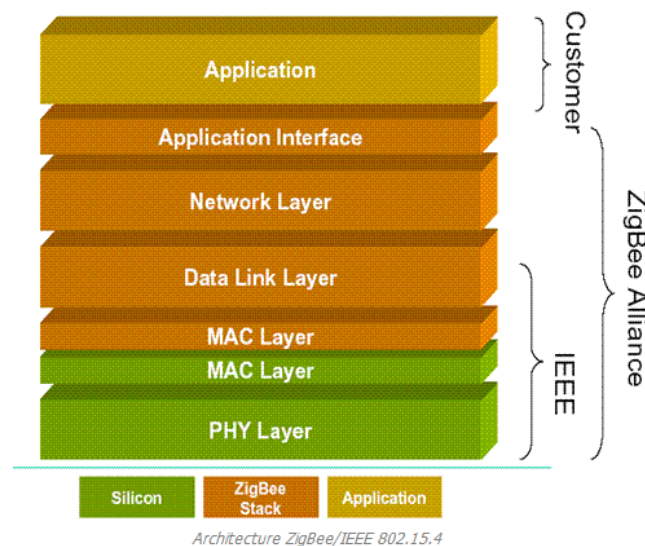


Figure 93 : Pile de protocoles Zigbee

http://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/Module_RCSF_45.html (consulté le 6 février 2017)

La couche physique (PHY Layer) gère les fréquences d'émission et de réception, le débit des données envoyées ou reçues, le type de modulation et le codage des informations. La couche d'accès au médium (MAC Layer) s'appuie sur la couche inférieure. Elle définit la façon dont les nœuds du réseau dialogueront. On trouve le détail du fonctionnement dans la spécification standard IEEE 802.15.4⁹⁵. La couche réseau (network layer) porte sur les règles servant à établir un réseau,

⁹⁵IEEE 802.15.4™ - 2011, IEEE Standard for local and metropolitan area networks - Part 15.4 : Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) - <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2011.pdf>

à associer et interconnecter les nœuds dans le réseau, assure le transfert des informations via une route et aussi la structure des trames appelées « paquets » (messages) échangées.

Une trame de données ZigBee peut se traduire par la structure suivante issue de Descharles & Waïa (2006)

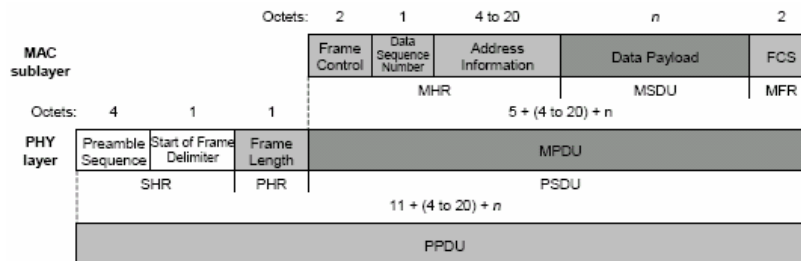


Figure 94 : Trame de données Zigbee

Chaque couche protocolaire complète la trame par sa structure incluant des entêtes et queues de trames spécifiques. Le PPDU (Physical Protocol Data Unit) est le train de bits qui correspond à la trame envoyée réellement sur le médium.

Dans un réseau ZigBee, il existe différents types de trafics selon la nature des données : les données périodiques comme celles des capteurs (réveil du capteur lors d'une réception, vérification du message et remise en veille), les données intermittentes comme celles issues d'application ou stimulus d'un interrupteur (soit en mode beacon ou en mode déconnecté avec économie d'énergie) ou les données à faibles latences répétitives provenant par exemple d'une souris ou d'un capteur de type LilyPad⁹⁶ (avec gestion du temps, durée déterminée et ordonnée avec utilisation d'une méthode de gestion de QoS (Quality of Service) nommée GTS (Guaranteed Time Slot)).

Nous utilisons un réseau maillé supporté par le protocole ZigBee, simple à mettre en œuvre et économique. Cette topologie nous permet de disposer de plusieurs nœuds composés de coordinateurs, de routeurs et de feuilles. Les signaux issus des différents capteurs ou dispositifs de notre plate-forme matérielle circulent dans notre réseau maillé.

Ce réseau est constitué de cartes de développement XBee sur lesquelles reposent des modules XBee S2C ZigBee avec antenne PCB et une bande de fréquences de 2,4 GHz.

A vrai dire, comme évoqué précédemment, notre choix n'a pas été posé après ces comparaisons entre les différents protocoles mais plutôt en fonction de l'expérience que nous avons faite dans le projet PLUG. Au vu de la réflexion menée a posteriori, notre choix reste pour l'instant le même sans avis plus expert sur la question et pourrait évoluer du fait de notre contexte différent avec l'utilisation d'autres techniques distantes et en fonction de l'émergence de nouvelles technologies.

⁹⁶ <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardLilyPad/> - consulté le 24 août 2019

De nombreux systèmes d'exploitation sont implémentés dans les capteurs sans fil ou dispositifs dits embarqués. Ils sont indispensables au fonctionnement des matériels et offrent selon les systèmes des possibilités et caractéristiques différentes. On peut citer TinyOS, modulaire et open source, conçu pour les systèmes embarqués à faibles ressources (P. Levis, 2006.), Contiki, élaboré pour des capteurs miniatures (Dunkels A., 2004) qui optimise la consommation, MantisOS, léger et multitâche, conçu pour les capteurs sans fil (Bhatti S., et al, 2005), SOS, développé pour les RCSF dynamiques et modulaires (C-C. Han, C-C., et al, 2005). Nous n'en parlerons pas plus ici.

3.3. Architecture sélectionnée

Nous avons dès le début de l'étude mené une réflexion quant à la mise en place d'une plate-forme de jeu pervasif afin de tester nos propositions.

Le schéma suivant représente l'environnement envisagé pour les différents tests à piloter tant du point de vue du réseau nécessaire à la communication, que des capteurs purement événementiels (relatifs au jeu) et des dispositifs relevant les signaux physiologiques, que de la base centrale à la gestion globale et ses traitements associés.

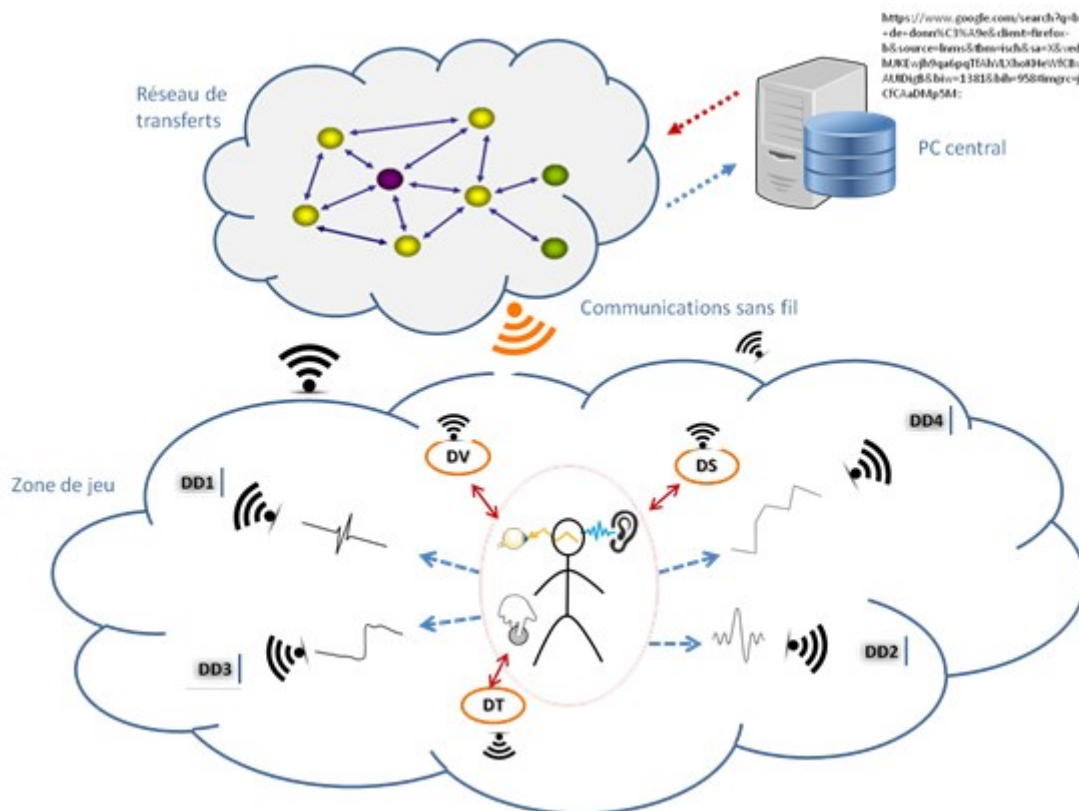
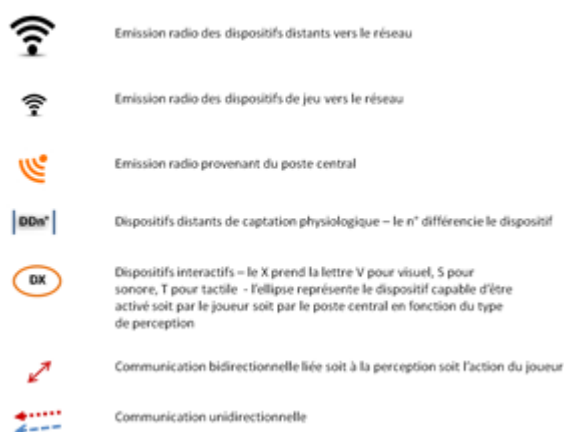


Figure 95 : Schéma de notre environnement futur

Légende



Nous ne revenons pas sur les matériels et logiciels déployés lors de nos premières expériences. Ils sont présentés en annexe 10 (plan d'expériences ... (chapitre 4)). Par contre, nous exposons les instruments que nous avons manipulés ou manipulerons à des fins de prototypages réseaux et ludiques. Nous dévoilons les télé-appareils pressentis pour la mesure des signaux physiologiques qui nous intéressent.

Pour construire notre plate-forme, nous avons opté pour la technologie sans fil par des communications radio à coûts et consommation réduits, fondée sur le standard 802.15.4, d'autant que notre réseau est à dimension personnelle, de courte distance. ZigBee est un protocole, comme nous l'avons vu, dont la portée est relativement courte, avec une bonne fiabilité, un coût léger et une faible consommation. Les communications seront établies à l'aide de modules Xbee sans fil qui mettent en œuvre ce standard.

Notre espace peut être découpé en trois parties, comme mentionné sur la figure 95 :

- La partie relative aux dispositifs physiologiques
- La partie relative au jeu concernant les interactions avec le joueur
- La partie liée aux échanges de données.

Dans la suite, nous présentons les dispositifs entrant dans l'assemblage de la plate-forme tout comme les outils nécessaires à leur fonctionnement.

3.3.1. Matériel

Nous avons exploré différentes voies pouvant nous conduire au remplacement des capteurs de contact. Plusieurs pistes s'offrent à nous : le domaine du radar (Radio Detection and Ranging) et l'optique.

Dans Yahiaoui (2013), les auteurs présentent un démonstrateur à partir d'une mesure radar. Le radar est mono-statique⁹⁷ et monochromatique⁹⁸ avec une fréquence de 5,8 Ghz. Le système fonctionne sous deux modes : le mode pulsé ultra large bande⁹⁹ ou le mode à onde continue ou entretenue¹⁰⁰ (CW). Pour la respiration, par exemple, les auteurs expliquent que c'est l'effet Doppler¹⁰¹ qui change la fréquence. Ils proposent une solution simplifiée à base de Diode Gunn¹⁰² et indiquent en conclusion qu'ils s'orientent vers une autre proposition à partir d'antennes planaires ou patches¹⁰³.

Dans la télédétection des signes vitaux, un industriel et l'université de Kyoto auraient développé une approche par radar à ondes. C'est un bon compromis pour nous qui ne souhaitons plus de capteurs à même la peau. Grâce à un écho, à la suite de l'envoi du radar, comme l'indique le schéma, il est possible de transcrire le rythme cardiaque.

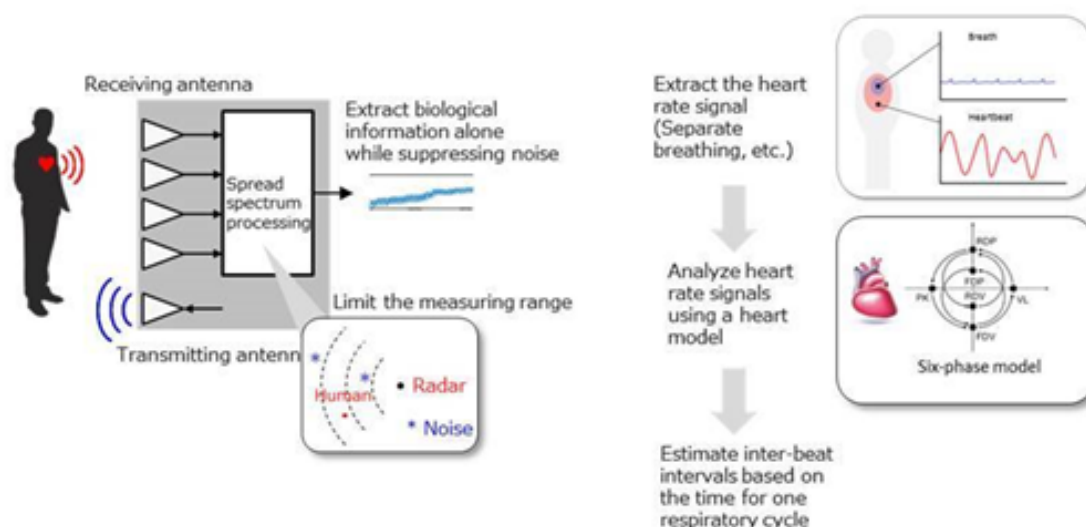


Figure 96 : Radar à ondes et rythme cardiaque

<https://www.businesswire.com/news/home/20160122006011/fr/> - consulté le 3 février 2019

⁹⁷ L'émetteur et le récepteur partagent la même électronique et la même antenne.

⁹⁸ Une onde monochromatique peut être décrite par une fonction sinusoïdale du temps.

⁹⁹ Le radar émet une impulsion et attend le retour.

¹⁰⁰ L'émission d'un signal hyperfréquence est sans interruption. L'écho est reçu et traité continuellement.

¹⁰¹ L'effet Doppler est le décalage de fréquence d'une onde acoustique ou électromagnétique entre la mesure à l'émission et la mesure à la réception lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps.

¹⁰² La diode Gunn est une diode utilisée dans les extrêmement grandes fréquences.

¹⁰³ Il s'agit d'une « antenne plane dont l'élément rayonnant est une surface conductrice généralement carrée, séparée d'un plan réflecteur conducteur par une lame diélectrique ». https://fr.wikipedia.org/wiki/Antenne_patch -consulté le 5 février 2019.

Sakamoto (2018) explique comment il a réalisé la mesure de l'activité cardiaque à l'aide d'échos radar. Dans le cas de l'utilisation des techniques infrarouges, Chauvin (2014) montre que les mesures prises avec une caméra thermique sont quasiment identiques à celles obtenues avec la ceinture thoracique. La caméra thermique est aussi un bon moyen de capter la température de surface de la peau à distance.

D'autres travaux ont été poursuivis à l'aide de caméras. Ceux menés par l'entreprise Philips s'expriment par l'image ci-dessous extraite d'une vidéo disponible sur le site. Elle affiche en temps réel les mesures de la fréquence cardiaque et de la fréquence respiratoire.

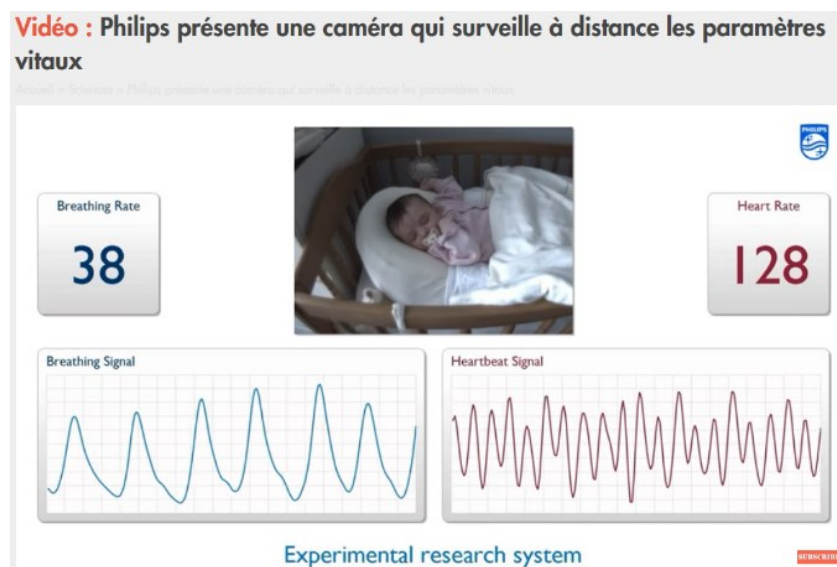


Figure 97 : Mesures de la fréquence cardiaque et de la fréquence respiratoire à l'aide d'une caméra

image extraite à partir de la vidéo sur <https://www.numerama.com/sciences/175381-philips-presente-une-camera-qui-surveille-a-distance-les-parametres-vitaux.html> - consulté le 3 février

2019

Dans l'article de Verkruysse et al. (2017), il est également mentionné d'autres signes vitaux comme la mesure de l'oxygène dans le sang¹⁰⁴.

Plusieurs appareils sont donc disponibles pouvant remplacer en partie les dispositifs de contact. Enchaînons notre présentation par notre réseau de communication, qui est essentiel aux échanges dans notre première vision de plate-forme, à partir de modules Xbee et Arduino.

¹⁰⁴ https://journals.lww.com/anesthesia-analgesia/Fulltext/2017/01000/Calibration_of_Contactless_Pulse_Oximetry.19.aspx - consulté le 3 février 2019

Les produits Xbee sont des modules de communication sans fil fabriqués par Digi International¹⁰⁵, certifiés par la ZigBee Alliance et conçus dans le but de concevoir des ensembles d'objets communicants. Ce sont des microcontrôleurs. Xbee utilise le protocole ZigBee. Il existe plusieurs catégories de Xbee : série 1, série 2, pro ... avec ou sans antenne.

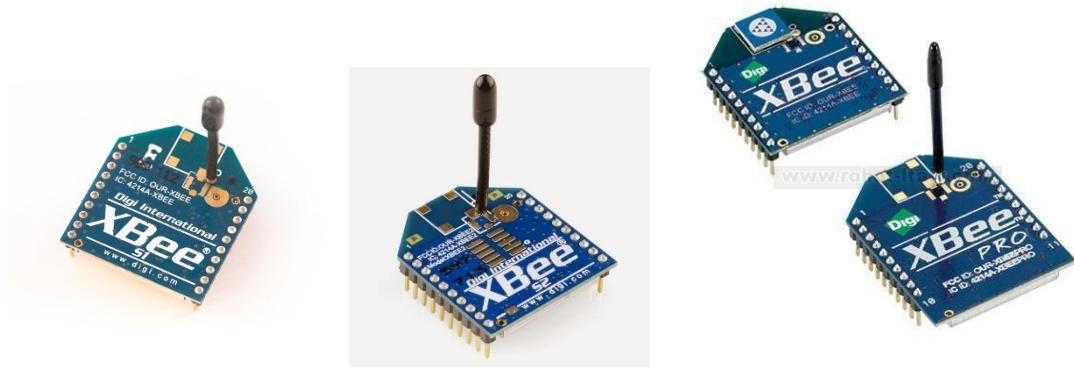


Figure 98 : Exemples de modules Xbee – série 1, série 2 et pro avec antenne

En fonction des caractéristiques attendues, le choix se porte sur la ou les catégories disponibles et compatibles. Par exemple, pour une portée allant de 10 à 100 mètres, on retiendra les Xbee 1 et 2, au-delà, on optera pour le Xbee Pro. Il est toujours important de vérifier les compatibilités des modules car, pour information, les séries 1 et 2 ne sont pas compatibles entre elles. Les produits Xbee offrent plusieurs topologies de réseaux (maillé, P2P, P2M selon les séries), un grand nombre de nœuds, une simplicité d'utilisation. Toutes les propriétés sont consultables sur le site de Matlog¹⁰⁶.

Le fait d'exploiter les ondes radio entraîne la nécessité d'utiliser des antennes pour l'émission et la réception des signaux, ce que nous procure les modules Xbee. La connexion avec l'ordinateur se fait par deux moyens : par USB (Xbee USB explorer) et par liaison série. Un point important est de vérifier l'alimentation. La communication directe entre plusieurs Xbee est possible sans passer par un autre environnement. Mais, il est plus facile de contrôler ce qui se transmet entre les modules en les intégrant, par exemple, à des cartes Arduino, afin de permettre, entre autre, la visualisation des messages échangés.

La transmission des données est réalisée après leur codage par l'émetteur puis, par leur acheminement au travers des supports physiques et enfin par un décodage, côté récepteur. Une

¹⁰⁵<https://www.digi.com/> - consulté le 26 janvier 2019

¹⁰⁶<https://www.matlog.fr/fr/57-modules-xbee-serie-1-24ghz-802154-et-digimesh-66307293571.html> - consulté le 26 janvier 2019

communication série asynchrone est établie lors d'une communication avec un module Xbee qui permet d'émettre et de recevoir des données en même temps grâce au fait qu'il soit en communication full duplex. Xbee est donc ce que l'on nomme un transceiver (émetteur/récepteur). Il y a deux types de communication : soit série, toutes les données sont transmises les unes à la suite des autres sur un même fil, soit parallèle mais dans ce cas des bruits peuvent se manifester à cause des fils très proches et générer des problèmes de transmission. Un contrôleur de communication est nécessaire pour passer du mode parallèle, utilisé par les processeurs, au mode série et ainsi transformer les données et les transmettre, et vice-versa. Ce contrôleur est un UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter), un émetteur-récepteur asynchrone universel. Les contraintes sont moindres du fait d'avoir retenu la technologie complémentaire Arduino. En effet, elle offre la possibilité de montage à partir de différentes techniques comme le ZigBee, la RFID, le Bluetooth, le Wi-Fi, l'infrarouge ... Ce qui correspond à nos choix et ouvertures envisagées.

L'Arduino est aussi un environnement de développement, appelé IDE (environnement de développement intégré) et de prototypage d'objets interactifs. Il est constitué d'une partie matérielle, d'une partie logicielle et d'un langage de programmation inspiré du C et C++. Toutes les sources sont ouvertes. Il existe une communauté très active.

La carte Arduino est composée principalement d'un micro-contrôleur ATmega, d'une prise USB, d'une alimentation, d'entrées et sorties numériques, d'entrées analogiques. Certaines broches de la carte servent de sorties analogiques. Le microcontrôleur est divisé en trois parties : une unité centrale (CPU, Central Processing Unit), des mémoires (ROM – Read Only Memory - et RAM – Random Access Memory) et des ports d'entrée/sortie (E/S). La figure ci-après représente les parties significatives d'une carte Arduino suivies de ses caractéristiques. Cette carte constitue souvent le cœur d'appareils comme des automates, des drones...

L'alimentation électrique peut se faire de deux façons : par la prise USB et par la prise jack (bloc secteur). La communication est effectuée par le port USB et les ports d'E/S.

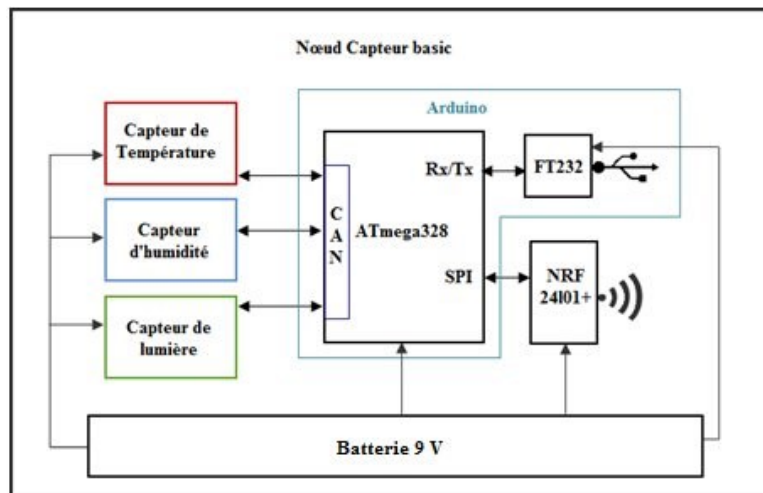


Figure 100 : Schéma d'un nœud basique Arduino

https://www.researchgate.net/publication/298762567_Conception_d%27un_Reseau_de_Capteurs_sans_Fil/figures?lo=1 - consulté le 27 janvier 2019

Nous constatons aisément sur ce schéma que le processus de fonctionnement démarre par la captation sur laquelle est effectué un traitement grâce, dans ce cas à l'ATmega328, puis la transmission à la sortie USB (FT232) ou sans fil (NRF2401+). Le tout nécessite bien sûr de l'énergie pour fonctionner.

CAN (convertisseur analogique numérique) est un dispositif de conversion des grandeurs analogiques en grandeurs numériques. Rx/Tx représentent la réception et la transmission. SPI (Serial Peripheral Interface) constitue un bus de transmission de données série synchrone (deux sens de circulation).

Bartman (2014), Margolis (2015), Schwartz (2015), Tavernier (2012) et VanDam (2016) ont écrit des ouvrages qui permettent de s'initier à l'Arduino, de progresser, de concevoir des projets originaux et des applications avancées et procurent des principes pratiques pour des installations de type domotique sur lesquels nous nous sommes beaucoup appuyés.

Les cartes Arduino nous ont permis de connecter et tester plusieurs capteurs qui entrent dans le jeu comme des dispositifs lumineux tels que des diodes, sonores comme des capteurs à ultrasons qui permettent de mesurer la distance qui les sépare de l'objet émettant un son, de présence, tactiles comme le tissu conducteur ou la carte Lilypad à coudre sur un vêtement ...

Pour étendre les fonctionnalités des cartes Arduino, des shields ont été installés. Ce sont des cartes apportant une aide à leur utilisation. Elles peuvent être fixées sur les cartes Arduino. On trouve par exemple des shields Ethernet ou WiFi, audio, tactiles, afficheurs ... Ils facilitent le prototypage.

Van den Bossche (2014) présente une architecture matérielle et logicielle Arduino et utilise le système OpenWiNo (Wireless Node) pour les aspects réseaux. Celui-ci est également une architecture matérielle et logicielle de conception et d'implémentation rapide de protocoles pour les RCSF et l'IdO. OpenWiNo a été porté sur Arduino. Le réseau proposé est composé de nœuds WiNo disposés dans un environnement réel (living lab ou maison intelligente) sur lesquels se raccrochent un ou plusieurs capteurs. Dans l'expérience, les auteurs manipulent un logiciel Web Cacti qui leur permet de voir en temps réel les données provenant des capteurs sous forme de graphes. L'ensemble de la plate-forme a été déployé en tant que prototype dans la Maison intelligente de l'IUT de Blagnac. Les travaux continuent. Van den Bossche (2017) montre l'avancée des travaux en matière de proposition d'une plate-forme de prototypage rapide d'objets connectés open source. Ces approches sont intéressantes. En effet, elles répondent à deux de nos besoins : le service de communications (le réseau) et la connexion des capteurs ou dispositifs. Cependant, il n'y a pas d'interaction, considération essentielle à notre projet. Leurs travaux restent néanmoins une source d'inspiration.

Pour nous initier à la mise en place d'un réseau maillé avec les trois catégories d'Xbee (coordinateur, routeur et feuille), nous avons eu recours à un kit Xbee – ZigBee maillé. Une fois les modules Xbee S2C associés aux cartes grove Digi, nous les avons connectés. Pour cela, une application de gestion et de configuration est nécessaire à la mise en route du réseau. Il en est de même pour l'exploitation des cartes Arduino. Ces outils sont introduits dans le paragraphe suivant.

3.3.2. Logiciel

Pour gérer le réseau de modules Xbee, nous avons exploité le **logiciel libre X-CTU**¹⁰⁷. Il s'agit d'un outil que la société DIGI met en libre accès¹⁰⁸ pour configurer ou reconfigurer les modules Xbee. C'est une application multi-plateforme. Quelques paramétrages préliminaires s'imposent au début comme la sélection du port (USB ou série), la vitesse de communication que l'on renseigne à 9600 bauds et un certain nombre d'autres informations tels que la parité, le codage...

Le logiciel dispose d'une interface conviviale (voir figure 101) et permet d'ajouter ou de trouver les dispositifs Xbee connectés. Les modules doivent être désignés en tant que coordinateur ou routeur ou end device. Pour communiquer, il faut les placer sur le même canal de communication et le même réseau.

¹⁰⁷ <https://www.digi.com/products/iot-platform/xctu> - consulté le 27 janvier 2019

¹⁰⁸ <http://www.digi.com/support/> - logiciel à disposition – consulté le 27 janvier 2019

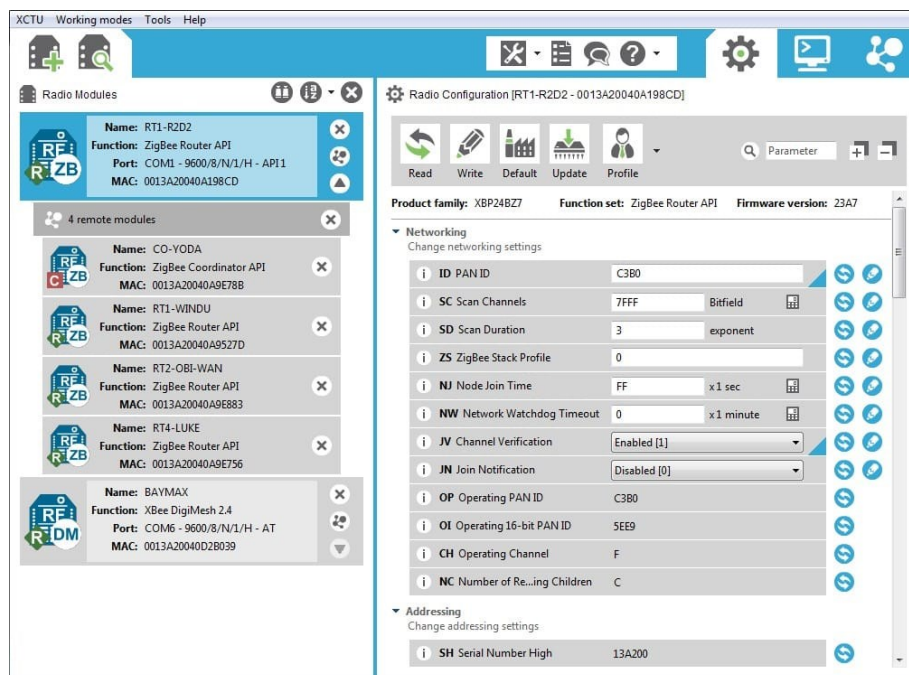


Figure 101 : Interface du logiciel X-CTU

Ce logiciel dispose également d'autres fonctionnalités de restauration des paramètres des modules, d'enregistrement des sessions des deux consoles (API - Application Programming Interface et AT). Pour l'Arduino, un logiciel est disponible à l'adresse¹⁰⁹. L'application Arduino est également le pilote à monter pour procéder à l'installation. Une fenêtre classique appelée sketch constitue l'interface.

Elle permet d'écrire et de téléverser un programme sur la carte (transférer le programme sur la carte), offre des préférences qu'il faut régler en fonction des besoins, regroupe les fichiers créés et met à disposition des exemples de programmes réutilisables, modulables et facilitant la mise en place de nouveaux composants et leurs tests.

L'interface IDE Arduino est la suivante :

¹⁰⁹ <https://create.arduino.cc/> - consulté le 27 janvier 2019



Figure 102 : Interface IDE Arduino

<http://arduino.blaisepascal.fr/index.php/presentation/logiciel-ide-arduino/> - consulté le 3 février

2019

3.3.3. Fonctionnement

Tous ces éléments fonctionnent bien séparément. Nous n'avons pas encore réalisé l'intégration de toutes ces parties. C'est une autre section de l'étude hors thèse. Un ordinateur central sera au cœur de l'architecture et supervisera l'ensemble de la plate-forme dont les transmissions de messages.

3.4. Conclusion

Pour réaliser notre plate-forme finale, nous avons besoin de différentes technologies tant au niveau des dispositifs que des outils. Il est difficile de lister tous les protocoles et techniques envisageables pour notre projet. Une étude approfondie au vu de nos spécifications serait à lancer pour réaliser un choix le plus optimal possible.

Au niveau réseaux de communications, des propositions de réseaux maillés nous ont été faites, en particulier, les travaux sur l'ordonnancement et le routage menés par Lilia Lassouaoui (2018) dans sa thèse qui feront l'objet d'investigations dans une étude ultérieure.

Les réseaux de capteurs tels qu'utilisés dans notre deuxième vague d'expérimentations constituent un réseau spécifique, fermé. Ce réseau peut évoluer vers un réseau ouvert en passant par Internet. C'est ce que l'on trouve dans l'Internet des objets industriels ou IdOI (IIoT – Industrial Internet of Things) qui tente de faire converger les réseaux hétérogènes de technologies de l'information (IT) et de technologies opérationnelles (OT) par la technologie Time Sensitive Networking (TSN) (Cisco Public, 2017 ; Time Sensitive-Networking Task Group, 2018 ; Zapke & Taylor, 2017) . Cette technologie, ensemble de sous normes IEEE 802, permet la prise en compte du temps et autres fonctionnalités comme la redondance transparente (aucune perte de données grâce à la reprise sur erreur). Ce procédé pourrait être envisagé dans le cadre d'un espace ouvert et vaste.

Les composants Arduino, Xbee ainsi que les multiples capteurs disponibles sont autant de matériels faciles à acquérir, à monter. Nous devons intégrer tous ces ingrédients pour en faire une plate-forme viable. L'utilisation de la plate-forme de Van den Bossche (2014, 2017) semble aussi une autre piste à condition de la faire évoluer pour offrir de l'interactivité.

Pour ce qui concerne le choix des télé-dispositifs, il est indispensable, avant leur mise en œuvre, de réaliser des expériences dans les mêmes conditions que dans nos premières expérimentations, afin de vérifier que les résultats obtenus avec ces nouveaux dispositifs sont similaires à ceux obtenus avec les capteurs de contact.

Nous ne pouvons pas passer sous silence que l'utilisation d'ondes pose question et est à examiner côté santé, en fonction de leur fréquence. Ce dont se charge l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé). Nous sommes sensibles à ces questions et nous savons que tout être vivant fonctionne sur un mode vibratoire. Nous sommes entourés de ces phénomènes. L'ajout d'ondes artificielles est-il nécessaire, y a-t-il des risques ? Les avis scientifiques divergent. L'article¹¹⁰ indique qu'une des solutions est d'être informé sur ces ondes électromagnétiques et sur les procédés de prévention.

Pour revenir à notre plate-forme globale, l'application centrale gérant l'interconnexion de toutes les parties, doit être développée ou éventuellement reprise à partir des structures existantes comme GASP (GAming Services Platform) ou uGASP¹¹¹, middleware [OSGi](https://www.osgi.org/) / [iPOJO](https://www.iipojo.org/) (orienté composants) dédié au jeu omniprésent et multijoueur voire autre.

¹¹⁰ <https://www.picbleu.fr/page/danger-et-risques-lies-aux-ondes-et-champs-electromagnetiques> - consulté le 5 février 2019

¹¹¹ <https://gasp.ow2.org/ubiquitous-osgi-middleware.html> - consulté le 3 février 2019

3.5. Bibliographie

- Asch, G. (2017). *Les capteurs en instrumentation industrielle*. Dunod, Paris.
- Bartman, E. (2017). *Le grand livre d'Arduino*. Collection Serial Makeers, Eyrolles, Paris.
- Baudoin, F., et Lavabre, M. (2007). *Capteurs : principes et utilisation*. Casteilla.
- Bhatti, S., Carlson, J., Dai, H., Deng, J., Rose, J., Sheth, A., Shucker, B., Gruenwald, C., Torgerson, A., and Han, R. (2005) "MANTIS OS : An Embedded Multithreaded Operating System for Wireless Micro Sensor Platforms", in *Journal Mobile Networks and Applications, Special Issue on Wireless Sensor Networks, Vol.10, Issue 4*, pp. 563-579
- Chauvin, R. (2014). *Mesure du rythme respiratoire sans contact*. Mémoire de maîtrise - Spécialité: génie électrique - Sherbrooke (Québec) Canada
- Dunkels, A., Gronval, B., and Voigt, T. (2004), "Contiki-A: Lightweight and Flexible Operating System for TinyNetworkedSensors", in *Proceedings of the 29th annual IEEE International Conference on Local Computer Network*, pp. 455-462.
- Han, C-C., Kumar, R., Shea, R., Kohler, E., and Srivastava, M. (2005) "A Dynamic Operating System for SensorNodes", in *Proceedings of the 3rd international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys '05), New York, NY, USA*, pp.163-176.
- Koné, C. T. (2011). *Conception de l'architecture d'un réseau de capteurs sans fil de grande dimension*. Thèse de doctorat, Université de Nancy.
- Lassouaoui, L. (2018) *Ordonnancement et routage pour l'augmentation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil*. Thèse de doctorat, Conservatoire National des Arts et Métiers.
- Levis, P. (2006) "TinyOS Programming manual". Cambridge Univ Pr.
- Margolis, M. (2015). *La boîte à outils Arduino*. 2^{ème} édition, Dunod, Paris.
- Ngom, D. (2016). *Optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité réseau*. Thèse de doctorat, Université de Mulhouse.
- Pellerin, R. (2004). *GAming Services Platform - Plateforme pour les jeux multijoueurs sur mobiles*. Rapport de stage projet MEGA
- Noury, N., Fleury, A., Nocua, R., Poujaud, J., Gehin, C., Dittmar, A., Delhomme, G., Demongeot, J., McAdam, E. (2009) *Capteurs pour la télésurveillance médicale. Capteurs, algorithmes et réseaux* – Elsevier Masson
- Pujolle, G. (2018). *Les réseaux : Edition 2018-2020. L'ère des réseaux cloud et de la 5G*. Eyrolles, Paris.
- Rawat, P. (2014). Wireless sensor networks: a survey on recent developments and potential synergies. *The Journal of Supercomputing*, 68(1), 1-48. doi: 10.1007/s11227-013-1021-9

- Sakamoto, T. (2018). *Measurement of instantaneous heart rate using radar echoes from the human head*. Electronics Letters - Institution of Engineering and Technology
- Schwartz, M.O. (2015). *Arduino pour la domotique*. Dunod, Paris.
- Servin, C. (2013). *Réseaux et télécoms*. Dunod, Paris.
- Tanenbaum, A., Wetherall, D.J. (2011). *Réseaux*. Pearson Education, Montreuil-sous-Bois. 5^{ème} édition
- Tavernier, C. (2012). *Arduino – Applications avancées. Claviers tactiles, télécommande par Internet, géolocalisation, applications sans fil, reconnaissance vocale ...* Dunod, Paris.
- Van Dam, B. (2016). *Tuto Arduino Uno*. Publitronic – Elektor International Media.
- Van den Bossche, A., Campo, E., Vigouroux, N., Vella, F. (2014). *Réseau de capteurs sans fil distribués pour le monitoring des activités de vie au sein d'une maison intelligente*. UbiMob2014:10èmes journées francophones Mobilité et Ubiquité, Jun 2014, Sophia Antipolis, France. 2014. <hal-01178586>
- Van den Bossche, A., Dalcé, R., Val, T. (2017). *Plateforme de prototypage rapide d'objets connectés avec la famille WiNo*. Revue : Internet des objets - Numéro 1 - Volume : 1 2017/03/31DOI : 10.21494/ISTE.OP.2017.0138 - ISSN : 2514-8273 - Éditeur : ISTE OpenScience
- Verkruysse, W., Bartula, M., Bresch, E., Rocque, M., Meftah, M., Kirenko, I. (2017). *Calibration of Contactless Pulse Oximetry - Anesthesia & Analgesia*: [January 2017 - Volume 124 - Issue 1 - p 136–145](#) - doi: 10.1213/ANE.0000000000001381 - Technology, Computing, and Simulation: Original Clinical Research Report
- Weiser, M. (1991). *The computer for the 21st century*. Scientific American, 265(3), 94-104, 1991
- Weiser, M., Brown J.S. (1996). *The coming age of calm technology*, Xerox Parc, 1996

3.6. Sitographie

Bissieres, C. (2008). Acquisition d'une grandeur physique (Capteurs), <https://www.les-electroniciens.com/sites/default/files/cours/capteurs.pdf>, consulté le 10 novembre 2018

Challal, Y. (2016) Réseaux de Capteurs Sans Fils, http://y_challal.esi.dz/wp-content/uploads/2016/05/PDF-RCSF.pdf, consulté le 6 février 2017.

Challal, Y. (2008) Architecture ZigBee/IEEE 802.15.4, http://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/Module_RCSF_45.html consulté le 6 février 2017.

Challal, Y. (2008) Module RCSF, https://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/Module_RCSF.html, consulté le 6 février 2017.

Cisco Public (2017) Time-Sensitive Networking : A Technical Introduction, <https://www.cisco.com/c/dam/en/us/solutions/collateral/industry-solutions/white-paper-c11-738950.pdf>

Descharles, S., Waïa, B. (2006) Topologie des réseaux, <https://wapiti.telecom-lille.fr/commun/ens/peda/options/st/rio/pub/exposes/exposesrio2006/descharles-waia/network.htm>

McCann, S., Ashley, A. (2018) Official IEEE 802.11 Working Group Project Timelines, http://www.ieee802.org/11/Reports/802.11_Timelines.htm

Time-Sensitive Networking (TSN) Task Group (2018) Dans *IEEE 802*. Consulté le 10 novembre 2018 à <https://1.ieee802.org/tsn/>

Zapke, M., Taylor, A. (2017) TSN : réseau convergent pour l'IoT industriel, <https://fr.farnell.com/tsn-converged-network-for-industrial-iot>

Chapitre 4

Des données, nos modèles

« Les choses paraissent simples jusqu'à ce qu'on commence à les analyser ».

Audrey Niffenegger

4. METHODES DE COLLECTE, D'ANALYSE DE DONNEES DE TYPE PHYSIOLOGIQUE ET NOS PROPOSITIONS TECHNIQUES..... 213

4.1.	INTRODUCTION.....	213
4.2.	METHODES DE COLLECTE ET DONNEES QUALITATIVES ET QUANTITATIVES.....	214
4.2.1.	<i>Introduction et définitions.....</i>	214
4.2.2.	<i>Collecte des données.....</i>	216
4.3.	LES TECHNIQUES DE STATISTIQUES.....	217
4.4.	COLLECTE, CHOIX DES TECHNIQUES ET METHODES.....	219
4.4.1.	<i>Collecte de nos données et choix.....</i>	219
4.4.2.	<i>Méthodologie et choix.....</i>	221
4.4.2.1.	Processus d'apprentissage, réseaux de neurones, et cartes auto-organisatrices.....	223
4.4.2.2.	Description des outils.....	234
4.5.	NOS DONNEES PHYSIOLOGIQUES, ANALYSES, NOS DEMARCHES, NOS MODELES.....	236
4.5.1.	<i>Notre prétraitement des données.....</i>	238
4.5.2.	<i>Méthodes factorielles appliquées.....</i>	241
4.5.3.	<i>Méthodes de classification utilisées.....</i>	248
4.5.3.1.	La technique des k-means et notre contexte.....	249
4.5.3.2.	La classification ascendante hiérarchique (CAH) et les données physiologiques.....	250
4.5.3.3.	La technique de self organizing map (SOM).....	256
4.5.4.	<i>La technique SOM appliquée à nos données.....</i>	257
4.5.5.	<i>Notre technique hybride EMDeep.....</i>	266
4.5.6.	<i>Conclusion.....</i>	274
4.6.	BIBLIOGRAPHIE.....	276
4.7.	SITOGRAPHIE.....	278

4. Méthodes de collecte, d'analyse de données de type physiologique et nos propositions techniques

4.1. Introduction

Dans le cadre de notre étude, nous souhaitons détecter les états émotionnels d'un utilisateur à partir de mesures physiologiques. Les données physiologiques sont recueillies au cours d'expériences ou jeux grâce à des capteurs. Ces données, pour avoir du sens, doivent être analysées et apporter des informations sur les actions à mener pour faire coïncider l'environnement de jeu à l'utilisateur. Afin de répondre au mieux à ces exigences, il nous faut établir une cartographie d'états émotionnels, à partir de mesures relevées, tel un étalon permettant d'adapter les expériences futures au joueur.

La première étape a consisté à mettre en place un protocole de prise de mesures. Ensuite nous avons lancé les expérimentations et collecté les données. La réalisation d'un étalon est un outil indispensable à notre travail. Quels sont les moyens possibles pour l'établir ? Il faut déjà être en mesure de connaître ou reconnaître un état émotionnel. Comment peut-on le découvrir ? Dans les chapitres sur les émotions et les interactions nous avons présenté comment il est envisageable d'y accéder. Nous avons opté pour l'association de certaines mesures physiologiques.

L'observation des informations est une des premières phases à appréhender afin de répondre à notre question. Ces informations constituent notre matériau de départ. Afin de pouvoir les analyser, il faut les collecter, les transférer, les stocker. Comment ensuite tenter de définir une classification d'états émotionnels d'un individu à partir de ces données ? Il existe plusieurs façons de tendre vers ce but. Nous verrons également que la visualisation des données sous différentes formes est une aide précieuse à la compréhension.

Nous proposons dans ce chapitre d'exposer le travail réalisé autour des données collectées. Cette partie est essentielle à la poursuite de notre objectif. Elle constitue le socle de la construction de notre canevas ludique et ajusté. Nous commencerons par expliquer les méthodes de collecte et les données récoltées. Avant d'exposer nos résultats, nous décrirons les techniques mathématiques, nos choix et les outils dont nous nous sommes servis. Nous conclurons par une synthèse de nos méthodes et leur potentielle évolution.

4.2. Méthodes de collecte et données qualitatives et quantitatives

4.2.1. Introduction et définitions

Dans un premier temps, nous avons réfléchi aux types de données pouvant apporter une réponse quant à notre questionnement sur le moyen de détecter des états émotionnels chez un individu voire explorer des phénomènes intéressants peut-être cachés de prime abord. Comme nous l'avons expliqué dans les chapitres sur les émotions et les interactions, nous avons fait des choix.

Avant de présenter notre méthodologie en matière de collecte et de travail sur les données, nous aimerions donner aux lecteurs quelques repères pour mieux appréhender ces informations.

Tout d'abord, qu'est-ce qu'une **donnée** ?

Les données sont partout autour de nous. Elles proviennent de nombreuses sources : la publicité, internet, des discussions, un livre, les informations de circulation dans le métro ... Une donnée représente une description élémentaire d'une réalité. Une mesure, une observation sont des données qui, après un certain travail, prendront du sens pour devenir information qui, elle-même une fois assimilée et utilisée, deviendra connaissance pouvant déclencher une action.

Par exemple, si nous prenons un objet ordinaire, un jouet comme un petit ours en peluche, nous pouvons remarquer qu'il recèle de nombreuses données. En effet, il a une taille, un poids, une forme, une couleur et aussi deux yeux, deux oreilles ... Nous constatons qu'il y a différents types de données :

- Des données qualitatives comme la description de la couleur du petit ours, sa douceur...
- Des données quantitatives comme le nombre d'yeux, de pattes ...

Cet ours est aussi un jouet et appartient à cette famille ou taxonomie.

Il y a également d'autres types de données comme les données discrètes que l'on peut compter (ex : le nombre de poils qui constitue la moustache du petit ours), les données continues qui sont des valeurs non entières (ex : le diamètre de ses yeux de 0.8 mm), les données catégorielles pour la classification en catégories ou modalités (ex : ours en peluche neuf, ours en peluche usagé) qui peuvent être ordinales (l'ensemble des catégories suit un ordre total) ou nominales (comme par exemple une catégorie de maladies).

Prises indépendamment les unes des autres, les données n'ont pas vraiment de sens alors que si on associe chaque élément et qu'on les interprète, elles deviennent informations, informations interprétables par l'humain comme la phrase suivante : un petit ours brun avec des yeux noirs...

Par contre, du point de vue informatique, les données présentées de cette façon ne sont pas

interprétables. Pour les rendre accessibles et lisibles par la machine, il faut que les données soient structurées dans un certain format.

Dans notre étude, les mesures physiologiques, collectées à l'aide d'équipements, sont des données qui nous renseignent sur l'activité cardiaque, l'activité respiratoire, la température et la résistance électrodermale. La combinaison de ces informations pourrait ainsi nous informer sur l'état émotionnel de l'utilisateur après analyse. Les connaissances obtenues nous permettront de ce fait de déclencher des événements. Nos mesures physiologiques représentent nos variables, données qui évoluent au cours du temps. Il est à préciser que ce ne sont pas les variables en elles-mêmes qui donnent directement des états émotionnels. Une émotion ne correspond pas à une variable physiologique mais à la combinaison de plusieurs variables. Ces variables doivent être analysées par des modèles mathématiques, statistiques, afin de faire apparaître des motifs pertinents ou patrons (patterns) qui seront à leur tour combinés à d'autres informations, telles que les données de jeu ou de l'environnement, et proposés comme nouvelles données externes au joueur.

Un autre point important à aborder est le **biais**. Dans toute expérience, se glissent des erreurs. C'est ce que l'on nomme un biais. Il y a différents types de biais :

- Au sens de la statistique ou de l'épidémiologie, le biais¹¹² est l'erreur apportée au résultat et issue de la démarche (biais de sélection, de mesure, d'estimation, d'interprétation, ...) (Albouy-Llaty, 2011)
- Au sens cognitif, le biais est un processus de l'esprit humain engendrant des erreurs de jugement (biais sensori-moteurs ou d'illusion, attentionnels, mnésique, de jugement ...). Il existe un codex des biais cognitifs (annexe 5 biais cognitifs (chapitre1)). Les biais peuvent impacter les données qualitatives comme les données quantitatives mais aussi la mise en œuvre de l'expérimentation, l'expérimentation elle-même et les questionnaires élaborés.

Boucher (2014) et le lien¹¹³ présentent dix biais cognitifs qui nous dupent très souvent dans le contexte du marketing et¹¹⁴ qui s'appliquent très bien à d'autres univers et, pour la préparation de questionnaires (Giezendanner, 2012).

¹¹² Les biais - Marion Albouy-Llaty - http://medphar.univ-poitiers.fr/santepub/images/staff_2011/0525_BIAIS.pdf, consulté le 3 novembre 2017

¹¹³ <https://www.consoglobe.com/10-biais-cognitifs-qui-trompent-le-plus-souvent-cg>, consulté le 3 novembre 2017

¹¹⁴ Enquêtes : Principaux biais dans la formulation des questions -François Daniel Giezendanner - <http://icp.ge.ch/sem/cms-spip/spip.php?article1765>, consulté le 2 décembre 2017

Il est important de savoir que dès que des expériences sont menées, en particulier, en liaison avec l'humain, qui plus est dans un contexte expérimental, cela implique forcément des biais. Ces biais se faufilent à tous les niveaux de la recherche, de l'étude. Pannucci et Wilkins (2010) donnent des indications sur la manière de les identifier et de les éviter.

Nous souhaitons donc le moins de biais possibles dans le cadre de nos expérimentations. Comme nous le savons, dès que nous plaçons un individu dans un contexte expérimental il est impacté par le fait de l'expérimentation elle-même ainsi que par la présence de l'expérimentateur. Ce phénomène est nommé l'effet Hawthorne ou effet de l'observateur (Vallerand, 2006). Le sujet peut modifier son comportement car il sait qu'il est observé.

4.2.2. Collecte des données

Il existe deux grandes méthodologies de collecte de données :

- les sondages

C'est une méthode statistique mise au point à partir de deux techniques : l'échantillonnage et le questionnaire.

- les plans d'expériences

Les plans d'expériences s'intègrent dans le processus d'acquisition des connaissances. Les expérimentations qui accompagnent les recherches scientifiques ou les études industrielles peuvent être organisées grâce à ces plans. La méthode des plans se fonde sur deux notions :

- L'espace expérimental : la grandeur d'intérêt mesurée à chaque expérimentation ou essai s'appelle réponse. Cette grandeur dépend de plusieurs variables nommées dans ce contexte facteurs.
- La modélisation mathématique : des fonctions mathématiques sont choisies pour relier la réponse aux facteurs.

On compte différents types de plans selon les expériences et les facteurs à traiter. Pour plus de détails, on pourra consulter le travail de J. Goupy (2010). La figure ci-après met en avant les parties optimisées par les plans d'expériences.

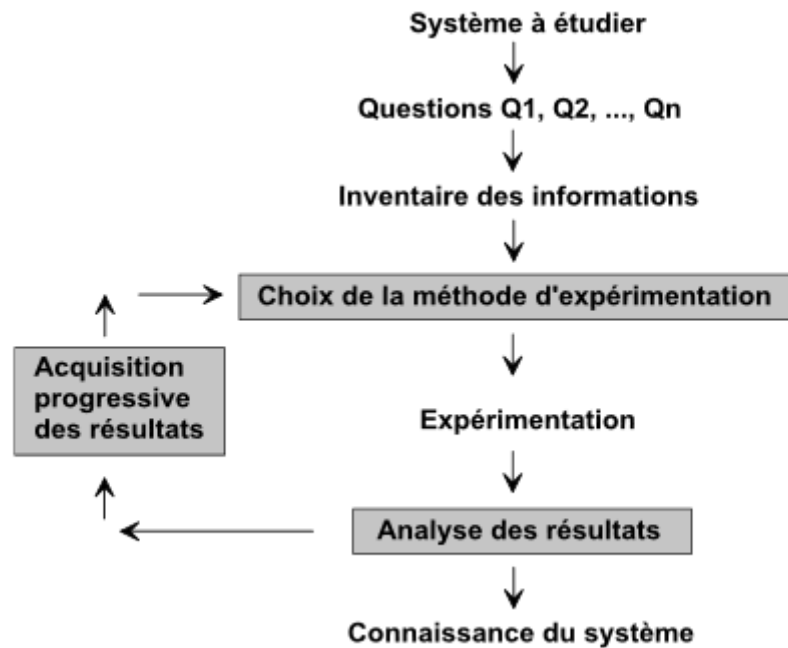


Figure 103 : Les plans d'expériences optimisent les trois parties encadrées du processus d'acquisition des connaissances

Extrait de <http://excerpts.numilog.com/books/9782100592968.pdf> consulté le 18 novembre 2017

Afin d'obtenir une bonne approximation du comportement de l'utilisateur/joueur, le maniement de modèles mathématiques s'impose. Le comportement, comme l'indique M. Mermillod (2016), « sera déterminé à la fois par des variables situationnelles (la situation dans laquelle se trouve l'individu), mais aussi par des variables dispositionnelles (la structure cérébrale d'un individu façonnée par la biologie et par son histoire) ». Les techniques de statistiques nous assistent dans notre démarche et font l'objet de la partie suivante.

4.3. Les techniques de statistiques

Face à des données, quelles sont les attitudes à adopter, comment les exploiter ?

Le domaine des statistiques et de l'analyse de données ou, plus généralement, « l'esprit de la statistique »¹¹⁵ va nous permettre de répondre à ces questions en cela qu'il permet de décrire les phénomènes, de prédire et prendre en conséquence les décisions nécessaires. Pour aborder ce domaine, quelques définitions sont requises. Le concept essentiel de la statistique est la variabilité. Pour plus de détails on pourra se référer à G. Saporta (2011).

¹¹⁵ Expression reprise de Gilbert Saporta

Néanmoins voici quelques concepts de base :

On appelle population la notion de groupes ou d'ensembles d'objets. Ces objets sont des individus ou unités statistiques. La partie représentative utilisée dans la population, par exemple pour une observation ou un sondage, constitue l'échantillon. Chaque individu dispose de caractéristiques désignées sous le nom de variables ou caractères.

En ce qui concerne les techniques ou modèles mathématiques, le monde de la statistique est vaste, nous présentons ceux que nous avons rencontrés mais pas forcément utilisés. Nos choix sont exprimés dans le point 4.4. Shu-Hsien et collaborateurs (2012) présentent une revue des techniques et applications en exploration des données (data mining) qui apportent un éclairage sur l'utilisation de ces méthodes au niveau applicatif.

Les statistiques nous offrent deux grandes classes :

- Les statistiques descriptives, exploratoires ou analyse de données portent sur la synthétisation de l'information contenue dans les données en utilisant la visualisation sous forme, par exemple, de tableaux ou de graphiques. Elles laissent peu de place au hasard et permettent la mise en évidence de propriétés des échantillons. Les méthodes sont la description par variables et associations de variables, la classification, la réduction des dimensions (méthodes factorielles).
- Les statistiques inférentielles portent sur la théorie des probabilités en réduisant la quantité d'informations à traiter en échantillons et en utilisant une part de hasard. Elles permettent d'appliquer les propriétés des échantillons à une population plus large et de valider ou pas ce qui a été trouvé de façon exploratoire. On y trouve l'estimation, la vérification ou test, la modélisation par relation approximative (régression linéaire) et la prévision.

Dans les années 1990 arrive une nouvelle discipline à la croisée de la statistique et du traitement de l'information. Le traitement de l'information est l'association de l'informatique pour l'acquisition et le traitement des données et des statistiques pour leur analyse. Les ordinateurs devenant de plus en plus puissants et les données de plus en plus massives, des techniques de plus en plus sophistiquées sont utilisées comme la fouille de données ou data mining, l'apprentissage automatique (machine learning) champ d'étude de l'intelligence artificielle et, plus précisément, l'apprentissage profond (deep learning) fondé sur des processus d'acquisition de modèles de données. On va chercher à extraire des connaissances des données à l'aide de méthodes automatiques ou semi-automatiques. Les modèles sont obtenus par exploration des données et non d'une théorie particulière par variation des paramètres comme le nombre de couches dans un

réseau de neurones, de façon à avoir les meilleures prédictions. « *Un modèle réalise un compromis entre sa capacité à rendre compte des données d'apprentissage et sa capacité de généralisation à de nouvelles données* ». G. Saporta (2011)

Les choix des méthodes se font en fonction de la quantité de données à traiter, de leur type et de ce que l'on cherche.

Un pan important de l'analyse de données consiste en la visualisation. William Playfair¹¹⁶ disait à ce sujet qu'un dessin vaut mieux qu'un tableau de chiffres. Et comme l'indique Dominique Cardon « *ce que la visualisation des nouvelles traces digitales fait alors voir, c'est que les catégories d'interprétation traditionnelles ne tiennent plus d'elles-mêmes et qu'il faut commencer par regarder avant d'interpréter* »¹¹⁷.

La visualisation est obtenue à partir d'un ensemble de techniques graphiques visuelles de représentation des données qui apporte une aide à l'interprétation, à l'exploration et à la décision. Il facilite aussi la communication sur ces données. La visualisation fait l'objet de nombreuses recherches¹¹⁸.

4.4. Collecte, choix des techniques et méthodes

4.4.1. Collecte de nos données et choix

Comme expliqué dans l'introduction, lors du projet PLUG, nous avons mené des expérimentations à base de capteurs qui n'ont pas donné satisfaction. Il fallait poursuivre. L'idée nous semblait toujours intéressante et inexplorée, selon notre point de vue, sur la question d'association de mesures physiologiques à des états émotionnels. Forts de cette expérience et des réflexions a posteriori, nous avons mis en place de nouvelles expérimentations avec un plan d'expérience plus abouti et des dispositifs professionnels. Nous nous sommes posé un certain nombre de questions sur nos facteurs expérimentaux, sources de variations, nos variables ainsi que sur les relations entre ces deux éléments.

Le protocole expérimental a été conçu en fonction de la collecte des données à savoir des données physiologiques, du type de variables, de la précision souhaitée, de la cohorte. Le protocole a été élaboré en collaboration avec une étudiante en master de psychologie. La captation et l'enregistrement des données ont été réalisés à l'aide de différents outils. Les données quantitatives

¹¹⁶ (1759-1823) - Ingénieur et économiste écossais, un des pionniers de la représentation graphique de données statistiques

¹¹⁷ <http://www.cairn.info/revue-multitudes-2012-2-page-138.html> consulté le 14 novembre 2017.

¹¹⁸ Par exemple RES (Recherche en visualisation de données) est un cycle de recherche, de valorisation et de médiations scientifiques sur la visualisation-représentation de données.

et qualitatives recueillies sont issues d'un plan d'expérience et de questionnaires. Le détail complet est disponible annexe 10 (plan d'expériences... (chapitre 4)). Il formule la méthodologie, décrit les expérimentations tant du point de vue de l'identification du protocole, du thème de l'étude – à savoir construire une cartographie des émotions à partir de mesures physiologiques – de l'objectif de mise en relation, de rapprochement des données des capteurs, des images des événements et des utilisateurs, que les questionnaires obtenus à l'issue de chaque expérience, à des fins d'analyse et de fouille. Les facteurs étudiés et à contrôler sont aussi présentés. Ce sont les quatre variables physiologiques. Il est également exposé tout l'environnement matériel et logiciel, les matériaux expérimentaux utilisés et/ou créés i.e. les supports stimulant ou pas les usagers. La cible et les variables dépendantes sont précisées. La mise en œuvre des expériences est retracée. Ceci permet ainsi la reproduction du protocole. Différents extraits d'enregistrements obtenus, un modèle de questionnaire ... sont produits, tout comme les ressources humaines nécessaires au bon déroulement de la collecte.

Les données qualitatives ne font pas partie de notre analyse. Elles feront l'objet d'une autre étude. Elles sont constituées des questionnaires, de vidéos et des informations provenant du physioscan. Les données recueillies des questionnaires papier ont été retranscrites dans un tableur. Les autres données qualitatives, hors vidéo, ont été également extraites et doivent subir un autre traitement. Les vidéos ont servi ponctuellement dans l'approfondissement des analyses de données quantitatives. En fonction du type de données recueillies : textes, images, information symbolique... les techniques d'analyse sont différentes.

Les données quantitatives collectées par les capteurs physiologiques sont des transformations de signaux électriques en valeurs numériques, elles-mêmes stockées dans des fichiers sous format csv (comma separated value), format très largement utilisé dans les échanges de données et lisible par des tableurs. Ce sont ces fichiers que nous exploitons dans l'analyse des données.

En optant pour des données physiologiques, nous éliminons certains biais car c'est le système nerveux autonome (SNA) qui gère ces signaux et non la personne. L'individu aura donc beaucoup de mal à agir sur ces données. Plusieurs études ont été menées sur la reconnaissance d'états émotionnels à partir de signaux de ce type. Marzuki et collaborateurs (2016) ont utilisé un seul capteur biologique et recueillent déjà des résultats engageants. Ils indiquent que, néanmoins, pour obtenir de meilleurs résultats il aurait fallu utiliser d'autres capteurs.

Hamdi (2012) et Abdat (2010) ont manipulé différents capteurs physiologiques et montrent que l'usage complémentaire de capteurs de GSR et température améliorerait leurs résultats (Hamdi, 2012) ou montrent la pertinence des mesures physiologiques dans la reconnaissance des émotions avec stimuli appropriés (Abdat, 2010).

En ce qui concerne les questionnaires, entretiens et déclarations, nous avons décidé que l'intervieweur remplirait les formulaires afin de ne pas contraindre les participants à écrire. Nous évitons ainsi d'autres biais (Pannucci, Wilkins, 2010) liés à la lassitude de l'utilisateur. Il s'avère que souventes fois, après avoir participé à des expériences, les utilisateurs n'ont pas envie de compléter des documents ou les remplissent à la va vite, induisant des erreurs. Le format de nos données et l'objectif à atteindre écartent certaines techniques et orientent vers d'autres moyens.

4.4.2. Méthodologie et choix

Une certaine quantité de données a été recueillie. Comment l'approcher, la comprendre ? Nous avons commencé par les données quantitatives car elles correspondent aux mesures issues des biocapteurs et sont celles qui pourront nous donner des informations internes sur les personnes. Les données qualitatives viendront nous conforter ou pas dans une autre analyse.

Reprenons nos objectifs. Pour détecter des états émotionnels et établir une classification, nous avons étudié différentes techniques utilisées en présence de données de type biosignaux électriques. Nos données sont constituées d'une date et d'un ensemble de quatre variables physiologiques, formant un vecteur, provenant de plusieurs individus. Ces variables évoluent tout au long des expériences. Nous cherchons à voir apparaître dans certaines situations des variations des mesures et peut-être des motifs de ces variations se répétant au cours d'une même expérience ou d'expériences différentes chez un individu ou communs à plusieurs individus sans les associer à des émotions. Nous souhaitons que les données parlent d'elles-mêmes sans les orienter vers ce que nous aimerions trouver.

Afin d'établir un modèle, nous allons devoir décrire un ensemble de phénomènes, découvrir des caractéristiques à partir de nos séries d'observations. Nous présentons dans le texte qui suit les travaux et discussions qui ont aidé à prendre des décisions.

Les travaux menés dans ce sens par Marzuki et al (2016) utilisent un seul capteur, LVQ¹¹⁹ (Learning Vector Quantization) et un mode supervisé. Zhai et Baretto (2006) mentionnent 4 variables où SVM¹²⁰ (Support Vector Machine) est utilisé en mode supervisé. Hamdi (2012) a travaillé sur la reconnaissance d'émotions à partir de quatre mesures physiologiques différentes des nôtres pour moitié. Il s'est servi de classifieurs. Trois méthodes ont été employées : SVM, la classification naïve bayésienne et régression logistique. Le travail réalisé est en mode supervisé.

¹¹⁹ LVQ est une méthode utilisée pour classer les modèles non linéaires en mode supervisé.

¹²⁰ SVM est un ensemble de techniques d'apprentissage supervisé.

Les émotions sont mises en relation dès le début avec les signaux physiologiques. La plupart des études portant sur les mesures physiologiques ou impliquant la détection d'émotions exploite des techniques d'analyse supervisées et ne répondent donc pas à nos attentes, faire que les données dévoilent des schémas sans les guider. Pour comprendre les approches, nous présentons les modes supervisé et non supervisé dans le paragraphe sur l'apprentissage.

Nous avons eu de nombreuses discussions avec des membres¹²¹ de l'équipe MSDMA (Méthodes statistiques de data-mining et apprentissage) du Cédric au Cnam afin de déterminer quelle(s) méthode(s) pourrai(en)t être appliquée(s) à notre problématique. Nous nous sommes questionnés sur l'objectif de l'analyse des données récoltées, sur l'apport de connaissances possibles, sur la pertinence de l'étude et la façon de l'aborder.

Les premières réflexions avec Fouad Badran et Méziane Yacoub nous ont conduits aux réseaux de neurones, plus particulièrement aux cartes auto-organisatrices, et à l'outil Matlab. La formation au domaine des données est vaste et a pris un volume de temps non prévu initialement dans la durée de la thèse. En effet, le travail attendu devait s'appuyer sur des résultats obtenus à partir des données d'expériences que nous avons menées, mais ne devaient pas constituer une partie aussi conséquente de la thèse. Avant de commencer à étudier les données et d'échanger avec les experts du domaine, nous pensions qu'il suffirait d'appliquer quelques algorithmes bien choisis. Il n'en est rien. L'utilisation directe de différentes méthodes ne peut s'opérer sur des données non comprises. Un auditeur souhaitant terminer son cursus Cnam et démarrer un mémoire d'ingénieur en apprentissage, réseaux de neurones et modèles graphiques est venu nous prêter main forte. Nous lui avons confié une partie des données et travaillé en collaboration sur une période de plus de 2 ans. Ce travail s'est déroulé en partie sur son temps libre et sur des stages courts au laboratoire Cédric. Nous avons changé d'outil et eu recours au logiciel R en raison des besoins de l'étudiant, du fait qu'il s'agit d'un logiciel libre et qu'il intègre un module relatif aux cartes de Kohonen. Une phase descriptive a alors commencé afin de mettre en relief des caractéristiques essentielles. Il n'a pas été donné suite à ce travail, pour des raisons indépendantes de notre volonté, pourtant, nous avons obtenu quelques résultats préliminaires encourageants. Nous avons présenté un article à la conférence IHM 2016 (Gal, Gressier-Soudan, 2016). Nous avons dû complètement réinitialiser ce travail et l'investiguer. Il est présenté en partie 5.

Comme indiqué précédemment, notre démarche vise à :

¹²¹ Fouad Badran, Professeur, en collaboration à différentes étapes du travail – Yacoub Méziane, Maître de conférences, au tout début de l'étude.

- Etudier nos données quantitatives à l’aveugle afin d’éviter les biais d’interprétation et d’orientation
- Etablir une classification des données sans connaissance préalable.

Les réseaux de neurones en mode non supervisé combinent l’information d’entrée, pour nous, les variables physiologiques, et l’analyse sans référence à des valeurs de sortie. Nous ne connaissons pas l’issue de prime abord. Ce type de réseaux devrait nous permettre d’identifier des caractéristiques spécifiques, des reconnaissances de motifs.

Pour comprendre les données et les intégrer dans des modèles, il est possible d’utiliser l’apprentissage automatique (machine learning), une technique informatique, sous-domaine de l’intelligence artificielle (IA). La plupart des techniques d’apprentissage repose sur des algorithmes mathématiques provenant de la statistique mais aussi issues de l’IA comme les algorithmes génétiques ou les réseaux de neurones artificiels. On parle alors d’apprentissage profond (deep learning). L’apprentissage automatique permet la classification des tâches en catégories. Celles-ci sont fonctions des modes utilisés. Dans le paragraphe suivant nous présentons les modes d’apprentissage, introduisons les réseaux de neurones et nous penchons sur les cartes auto-organisatrices.

4.4.2.1. Processus d’apprentissage, réseaux de neurones, et cartes auto-organisatrices

Comme nous l’avons indiqué, les approches peuvent être différentes. On dispose de deux grandes techniques d’apprentissage :

- Le mode supervisé
- Le mode non supervisé.

A vrai dire, il existe une troisième technique qui est l’apprentissage par renforcement dont nous ne parlerons pas car elle s’applique principalement au monde des agents autonomes comme les robots, loin de nos préoccupations.

Processus d’apprentissage

Le mode supervisé

Comme indiqué précédemment, « En classification supervisée, les classes sont connues à l’avance » (Hajjar, 2014). Notre approche se veut autre.

Dans le cadre du supervisé, nous disposons d'un ensemble de n éléments étiquetés encore dits labellisés E_n , d'une architecture de réseau A et des poids de départ w .

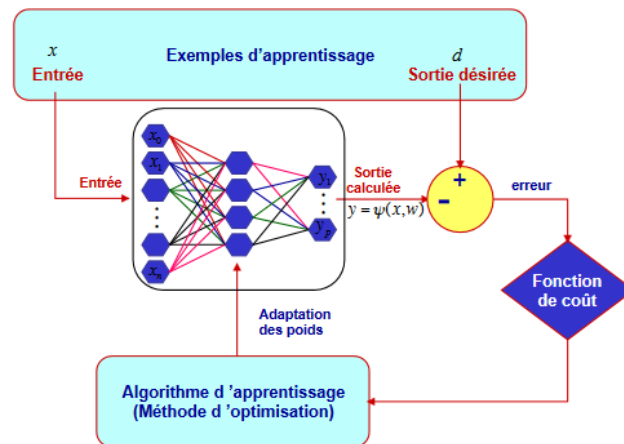


Figure 104 : Schéma d'apprentissage supervisé¹²²

Il faut trouver au moyen d'un algorithme d'apprentissage les poids les plus appropriés. Comme le montre le schéma ci-avant, l'apprentissage peut passer par un certain nombre d'itérations. Quand le réseau atteint un point de convergence, la phase de généralisation peut commencer. La convergence correspond à la sortie attendue pour l'ensemble des données d'apprentissage avec le minimum d'erreur.

Dans un apprentissage supervisé, les poids (coefficients synaptiques) sont évalués en minimisant l'erreur en comparant la sortie souhaitée à la sortie calculée sur une base d'apprentissage et une connaissance de ce que l'on doit trouver.

Le mode non supervisé

La classification en mode non supervisé, dite automatique ou clustering, s'effectue sans base d'apprentissage. Les données d'entrée sont partitionnées en groupes possédant des caractéristiques similaires sans connaissance au préalable, à l'aide de différentes techniques. C'est l'appartenance des observations à des groupes, appelés classes, qu'il s'agit de trouver à partir des descripteurs disponibles. Pour nous, ce sont les variables physiologiques.

Il existe une large famille de méthodes de classification non supervisée. On peut dire qu'on trouve deux grands types de méthodes non supervisées :

¹²² Schéma de Y. Bennani issu de

https://epat2014.sciencesconf.org/conference/epat2014/pages/EPAT_2014_ANN.pdf - consulté le 04/02/2018

- à approche géométrique : cette méthode utilise la hiérarchie ou le partitionnement ou encore la densité, les graphes et grilles. La classification se fait sur une mesure de proximité entre les individus.
- à approche probabiliste. La classification est identifiée en faisant l'hypothèse que toutes les observations appartenant le plus probablement à la même distribution sont regroupées dans la même classe.

Il existe d'autres méthodes non supervisées à base d'algorithmes génétiques ou encore à base de machines à vecteurs de support (SVM) ou classification à vecteurs de support (SVC). L'arborescence ci-après présente une vision générale de méthodes de classification non supervisée.

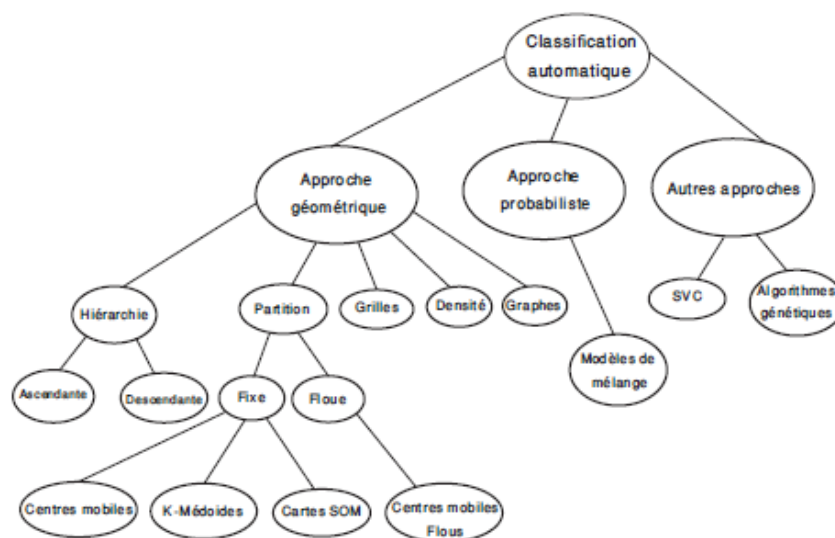


Figure 105 : Méthodes de classification non supervisée (Hajjar, 2014)

Grâce à cette technique, la tâche de regroupement des individus s'établit selon la similarité de leurs caractéristiques. Le choix d'une mesure de distance appropriée est primordial. Cette distance représente le moyen par lequel est calculée la similarité entre deux individus. Certains individus peuvent être très proches par certaines caractéristiques et éloignés pour d'autres (Zhang et Lu, 2003). Le regroupement d'individus peut parfois être simplifié si le nombre de classes est connu tout en restant en mode non supervisé puisque rien n'est labellisé. L'analyse de la répartition éclaire ainsi sur les convergence et divergence des caractéristiques des individus.

Faire du clustering, c'est faire de la segmentation et aussi assembler des points, les plus proches ou les plus semblables, ensembles, par classes ou clusters. La distance, la similarité et la dissimilarité sont les trois façons d'y accéder.

Le choix de la distance est important dans les méthodes d'exploration de données multiples. Il faut être capable de proposer une mesure de la ressemblance entre les observations la plus adéquate possible. Pour cela, on procède en trois phases :

- la phase de normalisation, qui évite les problèmes d'échelle entre les variables. Chaque variable apporte une contribution équivalente aux calculs des distances
- la phase de sélection des variables à partir de l'analyse descriptive et des connaissances initiales est un outil primordial pour aborder au mieux les données disponibles.
- la phase du choix du poids si nécessaire i.e. le poids attribué à chaque variable suivant qu'elle doit être plus influente dans le calcul des distances.

Ce choix est ainsi le fruit d'une réflexion par rapport au problème posé. Une distance est donc définie par trois propriétés :

- L'auto-similarité
- La symétrie
- L'inégalité triangulaire.

On utilise très souvent la distance euclidienne (2-distance, $\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$) et la distance de Manhattan (1-distance, $\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|$). Mais ce ne sont pas les seules.

Pour la similarité, qui consiste à mesurer la ressemblance entre les observations, la fonction S associe une valeur dans l'ensemble des réels positifs ($\mathbb{R}^+$) à tout couple (x_1, x_2) telle que :

$$S(x_1, x_2) = S(x_2, x_1) \geq 0$$

$$S(x_1, x_1) \geq S(x_1, x_2)$$

Plus les éléments se ressemblent et plus le résultat est grand.

En ce qui concerne la dissimilarité, moins les éléments se ressemblent plus elle est élevée. Par analogie à la similarité, la fonction D de dissimilarité associe une valeur dans l'ensemble des réels positifs ($\mathbb{R}^+$) à tout couple telle que :

$$D(x_1, x_2) = D(x_2, x_1) \geq 0$$

$$D(x_1, x_2) = 0 \Rightarrow x_1 = x_2$$

Il est à noter qu'une distance correspond à une dissimilarité.

Le clustering peut être abordé de différentes façons¹²³ :

- le clustering par agglomération avec le regroupement hiérarchique ascendant ou agglomératif ou bottom-up. Chaque point du cluster est petit à petit absorbé par le cluster le plus proche. Pour cela on cherche la dissemblance entre deux clusters (distance minimale, maximale, moyenne, ..., de Ward). On peut aussi utiliser la représentation des fusions successives sous forme de dendrogrammes. La hauteur d'un cluster dans cette représentation indique la similarité de deux clusters avant fusion.
- le clustering par partitionnement
 - hiérarchique descendant ou divisif ou top-down. Au début, tous les individus sont dans le même cluster. A chaque itération, un cluster est séparé en deux par un critère de séparation.
 - spectral. Le principe consiste en un graphe d'adjacence et de rassemblement de points en groupes.
 - k-means ou nuées dynamiques est une méthode itérative qui converge vers une solution quel que soit son point de départ
- le clustering par modélisation
 - mélange de gaussiennes (GMM, Gaussian mixture model). Dans ce type de modèle, les distributions des classes sont toutes gaussiennes (multivariées).
 - cartes de Kohonen (SOM). On peut aussi dire que cette méthode procède par raffinement des k-means.
- le clustering fondé sur la densité. Les clusters sont des régions denses séparées par des zones moins denses.

On affine le choix des techniques en fonction du type de données, de l'environnement ... Dans le clustering, le nombre de partitions peut croître plus qu'exponentiellement en fonction du nombre de données. Il n'y a donc pas de solution analytique au problème de classification.

Le clustering hiérarchique, très flexible, ne demande pas à définir le nombre de classes dès le départ. On peut le faire à partir du dendrogramme. Par contre, l'exécution de l'algorithme est gourmande en temps de calcul, en stockage, en mémoire, car il faut examiner toutes les distances deux à deux entre toutes les paires de points des données. Des solutions existent pour limiter ces consommations.

¹²³ (voir apprentissage artificiel – Fabien Moutarde – Ecoles des Mines)

Dans un apprentissage non supervisé, il n'y a pas de référentiel. Les poids sont déterminés par rapport à des spécifications générales. On dispose de n éléments d'entrée non étiquetés, d'une architecture de réseau et de poids initiaux w_i . On cherche les poids tels que les éléments soient regroupés correctement et qu'on obtienne une généralisation satisfaisante en fonction du contexte.

Le schéma ci-dessous résume et compare les deux modes : supervisé et non supervisé.

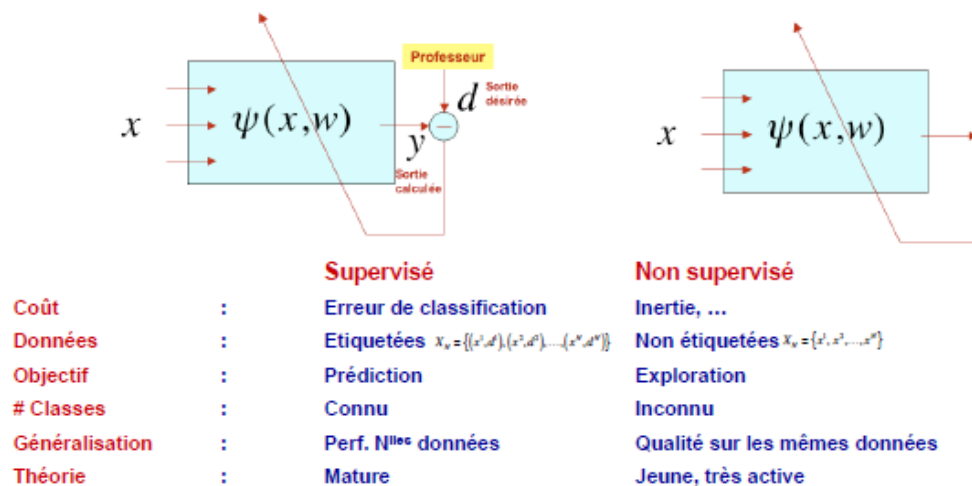


Figure 106 : Schéma de comparaison entre les deux modes¹²⁴

Nous cherchons à mener une analyse exploratoire sur des données physiologiques. Notre objectif est de découvrir si, à partir de celles-ci, il est possible d'observer et d'extraire des motifs pertinents pouvant nous amener à acquérir des connaissances sur ces données et plus spécifiquement une classification d'états que nous ne connaissons pas a priori. Les patterns obtenus nous aideront à construire un algorithme approprié capable de reconnaître des états émotionnels et éventuellement, dans une autre phase, de les prédire. Le but de cette analyse est de trouver un modèle capable de classifier ces états à partir des données physiologiques et de concevoir un référent : notre étalon. Au vu des modèles énoncés, la technique qui semble la plus appropriée pour atteindre notre objectif est le mode non supervisé qui offre une exploration à l'aveugle. Notre choix s'est donc porté sur une telle méthode.

¹²⁴ Schéma de Y. Bennani issu de

https://epat2014.sciencesconf.org/conference/epat2014/pages/EPAT_2014_ANN.pdf - consulté le 04/02/2018

Qu'est-ce qu'un réseau de neurones ? A quoi ça sert ? Comment l'utiliser ?

Un réseau de neurones artificiels s'inspire des réseaux de neurones biologiques (cellules nerveuses), comme nous le verrons plus loin, pour simuler des processus cognitifs tels que l'apprentissage et peut servir à prédire, identifier et classer des données. Il est constitué de neurones artificiels, encore dits formels, d'un ensemble d'unités de calcul élémentaire connectées entre elles. Le domaine du connexionnisme auquel appartient cette technique, s'applique à différentes spécialités comme les statistiques, le traitement du signal, l'imagerie ou encore la simulation d'apprentissage.

Le neurone formel se compose de deux parties :

- La partie concernant l'évaluation de la stimulation reçue
- La partie relative à l'évaluation de son activation (fonction f)

Il est caractérisé par les points ci-après et explicités dans la suite :

- Son état (binaire, discret, continu)
- Le niveau d'activation reçu en entrée (continu)
- Le poids des connexions

Pour mieux comprendre le fonctionnement du neurone artificiel, l'annexe 11 (neurone biologique (chapitre 4)) met à disposition quelques informations sur les neurones biologiques, et en particulier, sur les phénomènes d'activation. Ces phénomènes ont été repris dans les neurones formels. Pour plus de détails, on pourra se référer aux livres « Psychobiologie » de S. Marc Breedlove et collaborateurs (2012) et « Psychophysiologie » de F. Morange-Majoux (2011).

Par analogie au neurone biologique, le neurone formel fonctionne sur le même modèle et se caractérise par :

- Des signaux d'entrée x_i
- Des poids de connexions w_i
- Une fonction d'activation f
- Un état interne
- Un état de sortie

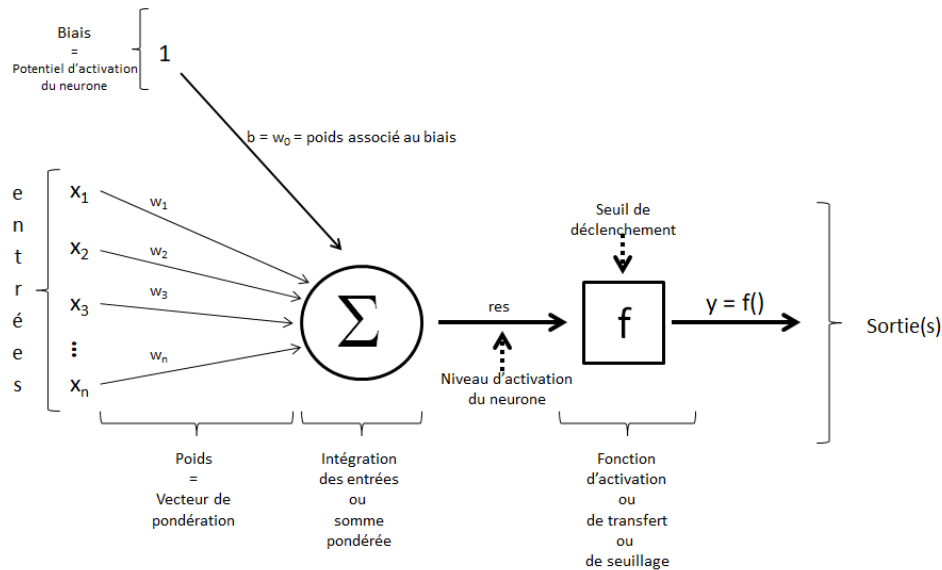


Figure 107 : Structure d'un réseau de neurone formel

Comme le montre la structure de la figure 107, le neurone formel reçoit en entrée des données $x_1, x_2, \dots, x_n$ sur lesquelles on applique des poids de connexions $w_1, w_2, \dots, w_n$ encore appelés vecteurs de pondération. La somme pondérée de ces éléments à laquelle s'ajoute un biais correspond à la phase d'intégration des entrées. Elle donne le niveau d'excitation ou d'inhibition du neurone et produit un niveau « électrique » qui dépend du niveau d'excitation selon une loi linéaire ou non nommée fonction d'activation. Cette fonction est choisie à partir de sa capacité à résoudre les phénomènes étudiés. Le biais b s'appelle aussi le "seuil d'activation du neurone". Lorsque son niveau d'activation atteint ou dépasse le seuil b alors l'argument de f devient positif, ou positif ou nul. Sinon, il est négatif. Ceci va déterminer le fonctionnement de la fonction de transfert ou d'activation présentée ci-après.

On note x_i ($1 \leq i < n$) les n informations parvenant au neurone. Chacune des informations sera plus ou moins valorisée via un poids. Un poids supplémentaire est utilisé et représente le coefficient de biais. Il est noté w_0 . Il est supposé être lié à une information x_0 .

Le neurone artificiel effectue une somme pondérée des entrées :

$$\text{res} = \sum_{i=0}^n w_i x_i \text{ ou encore } \left(\sum_{i=1}^n w_i x_i \right) - w_0 \text{ (faisant apparaître le poids associé au biais)}$$

Les w_i sont les poids et w_0 le biais. Ce sont les paramètres qu'il faudra identifier.

Les poids sont généralement inconnus et déterminés au cours d'un processus d'apprentissage, par biomimétisme. Il s'agit en fait de trouver des paramètres en minimisant l'erreur quadratique entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées. Cette erreur quadratique est une mesure qui caractérise la précision de l'approche.

L'entrée de la fonction d'activation du neurone res, c'est-à-dire son niveau d'excitation électrique, et la sortie y s'expriment par :

$$\text{res} = \sum_i w_i x_i - w_0$$

$$y = f(\sum_i w_i x_i - w_0)$$

$\sum w_i x_i$ est le niveau d'activation.

f est la fonction d'activation ou fonction de transfert. Elle permet de définir l'état interne du neurone.

Pour information, la fonction d'activation est une fonction qui applique un seuil en entrée. Si l'entrée est négative et ne passe pas le seuil, elle renvoie la valeur 0 ou faux, si elle est positive ou nulle et dépasse le seuil, elle renvoie 1 ou vrai. Elle permet une prise de décision.

Ainsi,

- au-dessous du seuil, le neurone reste inactif (sortie = 0 ou -1, en général et aussi parfois, -1)
- autour du seuil, il y a une phase de transition
- au-dessus du seuil, le neurone est actif (sortie = 1 ou n).

Autrement exprimé, si $\sum w_i x_i$ dépasse w_0 alors le neurone est activé sinon il reste inactif d'où le nom de seuil donné à w_0 . Une fois le calcul effectué, le nouvel état interne du neurone est propagé. y est la sortie du neurone, c'est-à-dire son niveau de réponse électrique.

La sortie du neurone vaut :

$$y = f(\text{res}) = f(\sum_{i=0}^n w_i x_i)$$

ou

$$y = f(\text{res}) = f((\sum_{i=1}^n w_i x_i) - w_0)$$

- neurone actif : $\text{res} \geq 0 \quad y = f(\text{res}) \geq \text{seuil} \quad y = 1$
- neurone inactif : $\text{res} < 0 \quad y = f(\text{res}) < \text{seuil} \quad y = 0$

Un neurone est donc un triplet (poids, biais, fonction d'activation). Chaque valeur d'entrée est multipliée par le poids correspondant (produit scalaire entrées poids). La valeur obtenue est comparée à la valeur de référence : le biais. Pour cela, le biais est soustrait. La fonction d'activation est ensuite appliquée à la différence. Le résultat dépendra du type de fonction d'activation utilisée. En effet, il existe différentes fonctions d'activation ou de transfert (voir tableau ci-après). Dans ce tableau le a correspond à notre y et n à res.

Nom de la fonction	Relation d'entrée/sortie	Icône
seuil	$a = 0$ si $n < 0$ $a = 1$ si $n \geq 0$	
seuil symétrique	$a = -1$ si $n < 0$ $a = 1$ si $n \geq 0$	
linéaire	$a = n$	
linéaire saturée	$a = 0$ si $n < 0$ $a = n$ si $0 \leq n \leq 1$ $a = 1$ si $n > 1$	
linéaire saturée symétrique	$a = -1$ si $n < -1$ $a = n$ si $-1 \leq n \leq 1$ $a = 1$ si $n > 1$	
linéaire positive	$a = 0$ si $n < 0$ $a = n$ si $n \geq 0$	
sigmoïde	$a = \frac{1}{1+\exp^{-n}}$	
tangente hyperbolique	$a = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}}$	
compétitive	$a = 1$ si n maximum $a = 0$ autrement	

Tableau 10 : Type de fonctions d'activation ou de transfert¹²⁵

Il en découle différents types de neurones formels qui s'illustrent par leur fonction d'activation qui peut être :

- Linéaire comme la fonction identité
- Seuil, fonction proche de la réalité biologique mais posant des problèmes au niveau de l'apprentissage
- ReLU (Rectified Linear Unit), unité de rectification linéaire, comme nous le verrons plus loin
- Stochastique, modèle plutôt utilisé dans les problèmes d'optimisation de fonctions perturbées ou dans les systèmes de particules
- ...

Ce sont des modèles mathématiques. Chacun des modèles répond à des problèmes spécifiques et peut-être combiné à un autre modèle pour donner des modèles hybrides.

Ces modèles peuvent servir à l'étude et la modélisation de phénomènes naturels d'apprentissage et/ou à résoudre des problèmes complexes. Des exemples d'applications de réseaux neuronaux sont cités par Shu-Hsien et collaborateurs (2012).

Un réseau connexionniste ou réseau de neurones est un graphe valué et orienté. Il est composé d'un ensemble d'unités architecturé en couches communicantes (connexion) donc capable d'échanger de l'information. Pour se faire, ces unités opèrent des calculs élémentaires. C'est ce que nous avons vu dans le fonctionnement des neurones formels. Le réseau évolue en fonction du type d'apprentissage. En effet, on peut modifier le poids des connexions, l'architecture ou les

¹²⁵ <http://informatique.coursgratuits.net/methodes-numeriques/reseaux-de-neurones-formels.php> - consulté le 20 janvier 2018. D'autres fonctions sont aussi disponibles à l'adresse https://fr.wikipedia.org/wiki/Fonction_d%27activation – consultée le 27 janvier 2018

fonctions intermédiaires des unités (fonctions de transfert, fonction d'activation ou de seuillage). Pour plus de détails sur l'historique des réseaux de neurones artificiels, on pourra se référer à¹²⁶. Nous allons voir dans la suite que selon le cheminement d'apprentissage, les réseaux sont différents.

Les cartes auto-organisatrices

Les cartes auto-organisatrices font partie des techniques adaptées à l'apprentissage non supervisé. Il s'agit d'une méthode de classification et de représentation de données. Elle permet de construire des partitions tout en respectant la topologie des données selon un principe de voisinage.

Les cartes auto-organisatrices émergent des travaux de Willshaw et Von Der Malsburgh (1976), travaux repris par Teuvo Kohonen qui a défini un algorithme original de classification. On parle souvent des cartes de Kohonen. Dans « The Self-Organizing Map », T. Kohonen (1990) explique comment sont organisées les données et comment les cartes sont efficaces dans la reconnaissance de patterns.

Il s'agit de former des classes de réseaux de neurones artificiels. « Techniquement, la carte réalise une *quantification vectorielle* de l'espace de données. Cela signifie *discretiser l'espace* ; c'est-à-dire le diviser en zones, et affecter à chaque zone un point significatif dit *vecteur référent*¹²⁷. » La figure ci-après est la traduction de la quantification vectorielle des données d'entrée en une grille associée aux vecteurs référents ou neurones gagnants. Les nœuds de la grille, le plus souvent bidimensionnelle, correspondent aux référents et conservent la géométrie des données d'entrée.

Kohonen (2012) détaille le fonctionnement de ces cartes. L'auteur explique également que les calculs de similarité ou de distance sont grands consommateurs de mémoire, de temps d'exécution et que le fait d'utiliser les cartes auto-organisatrices, encore appelées topologiques ou SOM (Self Organizing Map), permet de réduire l'ensemble des données et donc de réduire les calculs et leurs conséquences. Ces cartes sont intéressantes car elles préservent la topologie de l'ensemble des vecteurs.

L'algorithme SOM est une méthode fondée sur une abstraction simple du fonctionnement du SNC (système nerveux central).

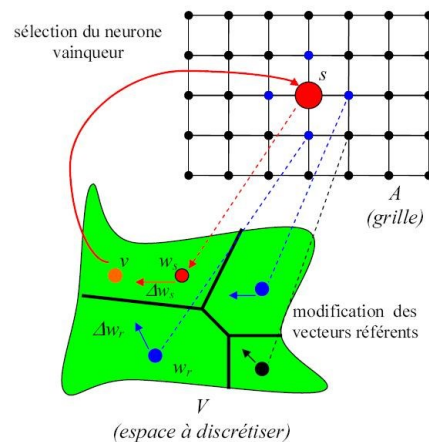
Cette méthode comporte des caractéristiques comme :

- Le nombre de classes défini par l'utilisateur
- L'adaptation aux données de grande taille

¹²⁶ <https://samos.univ-paris1.fr/archives/ftp/preprints/samos174.pdf> - consulté le 1er août 2019

¹²⁷ Issu de https://fr.wikipedia.org/wiki/Carte_auto_adaptative (consulté le 12 octobre 2015)

- La notion de voisinage entre classes
- Un support graphique (cartes) utile pour la visualisation et l'interprétation.



128

Figure 108 : Quantification vectorielle des données d'entrée vers une grille de référents

On visualise la structure des données en deux dimensions. Les classes obtenues de manière non linéaire regroupent les individus similaires. Deux données proches de l'espace multidimensionnel d'origine ont une représentation proche sur la carte du fait que la structure respecte la topologie des données de départ.

Des logiciels nous ont aidé dans l'analyse des données. Nous les exposons succinctement dans la partie ci-après.

4.4.2.2. Description des outils

Il existe de nombreux outils libres ou propriétaires d'analyse statistique comme XLstat, SAS, Statistica, spss, Matlab, Shogun, Bayesian filtering library, R, Tanagra ... Python est aussi très employé pour les statistiques et la science de données. Notre choix des outils s'est chaque fois porté sur des logiciels connus des collaborateurs et/ou de nous-mêmes. L'adaptabilité étaient de mise.

Comme nous avons eu recours aux cartes auto-organisatrices pour la classification des vecteurs d'entrée, les outils devaient nous permettre de les intégrer. Pour plus de détail, on pourra se référer aux documents fournis avec les logiciels listés ci-dessous.

Les outils successivement manipulés dans nos diverses analyses des données sont :

¹²⁸ https://fr.wikipedia.org/wiki/Carre_auto_adaptative#/media/File:Algorithme_som.JPG (consulté le 12 octobre 2015)

- Matlab

Le logiciel MATLAB¹²⁹ (Matrix Laboratory), payant, est conçu autour du langage Matlab par Cleve Moler dans les années 70. Il est utilisé pour le calcul numérique. Il compte de nombreuses boîtes à outils dont « neural network toolbox ». Cet outil a vite été abandonné car un stagiaire connaissant mieux le langage R et le logiciel associé, a intégré l'étude.

- R

R¹³⁰ est un langage de programmation et un logiciel libre de statistique et de sciences des données. Il est assez complet, s'exécute sur différents systèmes d'exploitation, offre des supports pour diverses méthodes d'analyse : analyse de séries temporelles, méthodes de régression, analyse de variance (ANOVA) ... Certains modules ou packages sont disponibles de base, d'autres sont téléchargeables en fonction des besoins dont le module « Kohonen » que nous avons exploité. Nous avons installé R Studio, une interface facilitant l'utilisation de R.

- Xlstat

Xlstat¹³¹ est un logiciel de statistique, payant, qui s'intègre à microsoft excel. Il offre de nombreuses fonctionnalités et modules selon les besoins métier. Il est automatisable et personnalisable. Nous nous en sommes beaucoup servi pour les statistiques descriptives, le pré-traitement des données, les méthodes factorielles et également pour appliquer différentes techniques comme les cartes de Kohonen. Cet outil nous a été précieux dans la première phase d'étude des données et les premiers pas avec Kohonen. Pour une plus grande souplesse de programmation, les étapes suivantes ont été réalisées avec R studio.

En tout état de cause et même si nous avons commencé à explorer les données au travers des réseaux de neurones et des cartes auto-organisatrices de Kohonen, le travail ne s'est pas fait directement. Au fur et à mesure des discussions et réflexions, la découverte et l'observation des données posaient sans cesse de nouveaux questionnements. Nous pouvons dire que ce processus exploratoire s'est déroulé à peu près comme suit et de façon itérative :

- Analyse d'un échantillon des données et observations
- Réflexion sur la poursuite et orientation

Comme pour toute analyse des données, nous avons commencé par un nettoyage de celles-ci et une première application des statistiques descriptives afin de se donner des pistes de travail.

¹²⁹ <https://fr.mathworks.com/products/matlab.html>

¹³⁰ <https://www.r-project.org/>

¹³¹ <https://www.xlstat.com/fr/>

Pour explorer les données nous avons exploité les méthodes de visualisation par nuages de points, des boxes plot ou boîtes à moustaches, axes principaux et les méthodes de classification. Elles permettent de mieux organiser, de hiérarchiser et de trouver les relations entre les données et aussi d'avoir une vue synthétique de l'information.

4.5. Nos données physiologiques, analyses, nos démarches, nos modèles

Nous allons étudier les données dans les différents cas suivants :

- Pour chacun des individus donc individu par individu pour chaque expérience
- Pour chacun des individus dans différentes expériences
- Pour tous les individus, expérience par expérience
- Pour tous les individus, toutes les expériences confondues.

Nous allons utiliser, pas à pas, à cet effet, des techniques de statistiques et d'intelligence artificielle de type non supervisé.

Comme évoqué précédemment, les données quantitatives recueillies se présentent sous forme de tableaux au format csv. Chaque tableau comporte cinq colonnes. La première colonne indique une date au sens large comprenant la date (jour/mois/année) et une heure (heure/minute/seconde/milliseconde), les quatre colonnes suivantes correspondent à nos quatre variables physiologiques respiration, activité électrodermale(GSR), température et fréquence cardiaque (CFM).

	Respiration	GSR	Temperature	CFM
18/02/2014 16:07:30.506	-3,905	-44,482	21,747	65
18/02/2014 16:07:30.537	-3,686	-44,482	21,747	65
18/02/2014 16:07:30.569	-3,491	-44,482	21,747	65
18/02/2014 16:07:30.600	-3,32	-44,482	21,747	65
18/02/2014 16:07:30.631	-3,172	-44,482	21,747	65
18/02/2014 16:07:30.662	-3,047	-44,482	21,747	65
18/02/2014 16:07:30.694	-2,977	-44,482	21,747	65
18/02/2014 16:07:30.725	-2,875	-44,482	21,747	65

Tableau 11 : Extraction d'un des fichiers

De façon générale, pour chaque individu I et par expérience Xp, nous avons le tableau générique ci-après :

Pour I_n et Xp_m				
tps	V1	V2	V3	V4

où tps est une variable chronologique « date » représentant des événements (stimuli) et V1 à V4 sont les variables physiologiques utilisées dans toutes les expériences. Ce sont des variables continues.

Le nombre de valeurs de la variable tps est équivalent en nombre d'observations pour certaines expériences et par individu mais, en règle générale, ce n'est pas tout à fait le cas.

En effet, trois des expériences ont été bornées dans le temps mais il existe des petites variations de quelques millisecondes liées aux synchronisations de début et de fin. Une des expériences pouvait être écourtée suivant les obstacles perçus ou non par le joueur. Par exemple, le game over pouvait se déclencher lorsque l'incarnation du joueur tombait dans un trou. Cela pouvait arriver au bout d'un temps très court (environ 3 – 4 minutes). Les tableaux 12, 13, 14 et 15 illustrent ces variations.

Variable	Observations	Variable	Observations
Respiration	48804	Respiration	48818
GSR	48804	GSR	48818
<u>Temperature</u>	48804	<u>Temperature</u>	48818
CFM	48804	CFM	48818

Tableau 12 et Tableau 13 : Exemple pour une même expérience de même durée

et deux individus différents I_x (1^{er} tableau) et I_y (2^e tableau)

La différence du nombre d'observations est faible car elle vaut 14 (48 818 – 48 804) et représente simplement 434 millisecondes sur toute la durée de l'expérience puisque le pas entre les observations est de 31 millisecondes.

Variable	Observations	Variable	Observations
Respiration	11445	Respiration	9877
GSR	11445	GSR	9877
<u>Temperature</u>	11445	<u>Temperature</u>	9877
CFM	11445	CFM	9877

Tableau 14 et Tableau 15 : Exemple pour une même expérience

où la durée de l'expérience est différente selon l'individu, et deux individus différents I_x (1^{er} tableau) et I_y (2^e tableau)

Ici, on a une durée de 48 secondes sur l'ensemble de l'expérience. Ce qui est également peu et n'impacte en aucun cas les expériences elles-mêmes puisque ce sont les variations des signaux qui nous intéressent.

4.5.1. Notre prétraitement des données

Nous avons parfois utilisé des tableaux intermédiaires pour les besoins de l'analyse. Nous avons procédé à un prétraitement des données afin de s'assurer d'une meilleure qualité. Tous les fichiers ont donc fait l'objet d'un ajustement, si nécessaire. En effet, nous avons considéré les données manquantes, les valeurs aberrantes et les valeurs extrêmes. Pour les découvrir, nous avons utilisé différents moyens et, en particulier, la détection automatique des données manquantes fournie par notre outil statistique. Pour les autres cas, nous avons observé les résultats relatifs au minimum, au maximum des valeurs ou encore leur moyenne. Ces résultats sont issus de la représentation synthétique des données. Ainsi, nous avons pu corriger (tableau 19) par exemple des valeurs de CFM indiquant des zéros (tableau 18 ci-après) qui auraient signifié que le nombre de battements cardiaques par minute était nul à certains moments (mort intermittente). D'autres valeurs observées semblant parfois extrêmes i.e. très grandes ont été examinées de près. Par exemple, dans le cas d'un CFM très élevé, nous avons appliqué la formule d'Astrand¹³² et la méthode de Karvonen¹³³ pour ne conserver que des valeurs plausibles. Il existe différentes techniques pour aborder ces sujets et nous avons considéré celles qui semblaient les plus adaptées aux signaux physiologiques, comme par exemple, le plus proche voisin. Les variations des signaux physiologiques ne présentent en général pas de changements brusques. La température de surface, par exemple, ne varie pas instantanément de 32° à 40°.

Les tableaux 16, 17 18 et 19 montrent le traitement appliqué lors de données manquantes (tableau 16) et dans le cas de valeurs extrêmes (tableau 18). Ces données particulières sont indiquées par des ellipses rouges. Une des explications plausibles de ces données manquantes est que le capteur ait dysfonctionné ou qu'il y ait eu une perte de message dans la transmission des informations vers le récepteur. Sans ce traitement, les analyses suivantes risquent d'être faussées.

¹³² http://campusport.univ-lille2.fr/mucci/Cours_2.pdf - consulté le 25 mars 2018

¹³³ <http://www.provincedeliege.be/sites/default/files/media/82/La%20formule%20de%20Karvonen.pdf> – consulté le 25 mars 2018

Tableau 16 et Tableau 17: Exemple de valeurs CFM manquantes

Avant traitement

Observation	Respiration	GSR	Temperature	CFM
...	...	...	...	...
Obs11424	-1,768	-39,677	27,966	
Obs11425	-1,752	-39,677	27,966	
Obs11426	-1,744	-39,665	27,966	
Obs11427	-1,736	-39,665	27,966	
Obs11428	-1,729	-39,665	27,966	
Obs11429	-1,768	-39,652	27,966	
Obs11430	-1,768	-39,652	27,966	
Obs11431	-1,838	-39,64	27,966	
Obs11432	-1,885	-39,64	27,966	
Obs11433	-1,978	-39,64	27,966	
Obs11434	-2,072	-39,627	27,966	
Obs11435	-2,212	-39,627	27,966	
Obs11436	-2,36	-39,615	27,966	
Obs11437	-2,563	-39,615	27,966	
...	...	...	...	...

Après traitement

Estimation des données manquantes : Plus proche voisin				
Observations avec des données manquantes remplacées :				
Observation	Respiration	GSR	Temperature	CFM
Obs11424	-1,768	-39,677	27,966	60,000
Obs11425	-1,752	-39,677	27,966	60,000
Obs11426	-1,744	-39,665	27,966	60,000
Obs11427	-1,736	-39,665	27,966	60,000
Obs11428	-1,729	-39,665	27,966	60,000
Obs11429	-1,768	-39,652	27,966	60,000
Obs11430	-1,768	-39,652	27,966	60,000
Obs11431	-1,838	-39,640	27,966	60,000
Obs11432	-1,885	-39,640	27,966	60,000
Obs11433	-1,978	-39,640	27,966	68,000
Obs11434	-2,072	-39,627	27,966	68,000
Obs11435	-2,212	-39,627	27,966	68,000
Obs11436	-2,360	-39,615	27,966	66,000
Obs11437	-2,563	-39,615	27,966	66,000

Exemple de remplacement de données manquantes (en gras) selon la méthode du plus proche voisin

Tableau 18 et Tableau 19 : Exemple de valeur CFM à 0 (ici le minimum)

Avant traitement

Statistiques descriptives :

Variable	Observations	Obs. avec données manquantes	Obs. sans données manquantes	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart- type
Respiration	15791	0	15791	-18,670	-17,898	-18,669	0,014
GSR	15791	0	15791	-34,384	-31,794	-33,490	0,572
Temperature	15791	0	15791	22,498	22,698	22,594	0,030
CFM	15791	0	15791	0,000	142,000	76,413	11,306

Après traitement

Statistiques descriptives :

Variable	Observations	Obs. avec données manquantes	Obs. sans données manquantes	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Respiration	15791	0	15791	-18,670	-17,898	-18,669	0,014
GSR	15791	0	15791	-34,384	-31,794	-33,490	0,572
Temperature	15791	0	15791	22,498	22,698	22,594	0,030
CFM	15791	0	15791	67,000	142,000	76,686	10,346

Les tableaux 18 et 19 offrent une synthèse pour un individu au cours d'une expérience. Il a été calculé le minimum, le maximum, les moyennes et les écarts-types. Ceci a été établi pour tous les individus et chaque variable.

L'écart-type est un indicateur de valeurs aberrantes. Il permet de mesurer la dispersion autour de la moyenne d'un ensemble donné. Plus un écart-type est grand, plus large est la distribution. Ceci montre l'intérêt de traiter les données manquantes ou autres et nous a permis d'intervenir sur nos données.

Nous avons également appliqué différentes techniques pour lesquelles des synthèses et des visualisations graphiques ont été opérées. Nous exposons ci-après des méthodes factorielles et des méthodes de classification.

4.5.2. Méthodes factorielles appliquées

Les méthodes factorielles ou méthodes d'analyse en axes principaux qui produisent des représentations graphiques sur lesquelles les proximités géométriques usuelles en points-lignes (individus) et entre points-colonnes (variables) traduisent les associations entre les individus et les variables.

On trouve la technique de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) qui fait ressortir les liaisons entre les variables quantitatives. Elle permet de construire une représentation graphique en deux dimensions, plus facile à lire et à analyser. Quand on dispose de seulement deux variables, c'est simple. En effet, chaque axe représente une des variables et la projection des points se fait selon les valeurs des deux variables sur ces deux axes. Quand on a plus de deux variables, la représentation visuelle est d'autant plus difficile qu'il y a de variables. En trois dimensions la représentation est encore possible mais au-delà, la limite de notre esprit se révèle. L'ACP ramène le nuage de points à deux dimensions. Les axes représentent des combinaisons entre les variables et non les variables elles-mêmes. Les calculs sont réalisés de façon à passer le plus près possible de tous les points. Chaque point est projeté sur le plan. De ce fait, un volume d'information est perdu. Il est donné par le calcul du cumul des distances de chacun des points par rapport au plan. L'ACP est un changement de base qui se traduit par une représentation de la base des variables initiales en une représentation dans la base définie des facteurs obtenus par les vecteurs propres de la matrice des corrélations. Cette matrice donne les coefficients de corrélation linéaire des variables associées deux à deux. Ceci constitue une première approche vers une analyse multivariée. L'ACP permet donc de simplifier la description des données corrélées. Les liaisons entre variables sont synthétisées par le cercle des corrélations comme sur le tableau 21 ci-après (corrélations). On peut aussi voir le sens des variables. L'examen de ces informations synthétisées nous informe aussi sur la proximité ou l'éloignement des observations.

Nous avons appliqué la technique de l'ACP sur chacun des individus. L'objectif est de revenir à un espace de dimension réduite (pour nous 2 au lieu de 4) en déformant le moins possible la réalité et ainsi obtenir un espace plus facile à analyser et pertinent des données initiales. Elle a donc porté sur les événements matérialisés par le temps. Cela permet de mettre en évidence la structuration en montrant le regroupement des événements selon des combinaisons de réponses aux questions que l'on se pose comme les liens entre les variables. Par exemple, existe-t-il une relation entre la variable température et la GSR ? Si oui, leurs variations sont-elles ressemblantes ? L'ACP a également été appliquée à l'ensemble des individus par groupe d'expériences identiques et individus différents, par groupe de même individu et expériences différentes et par groupe d'expériences différentes et d'individus différents.

Une fois les données prêtes, l'algorithme de l'ACP effectue sur la matrice événements/variables, individus/variables pour nous, des opérations telles que le centrage et la réduction des données, la diagonalisation de la matrice, le calcul des valeurs propres, des vecteurs propres ... Le type de corrélation dans l'ACP choisi est Pearson. La corrélation de Pearson évalue la relation linéaire entre deux variables continues sachant que, dans une telle relation, la modification de l'une des variables est associée à une modification proportionnelle d'une autre variable. C'est le coefficient de corrélation classiquement utilisé et approprié à notre contexte. Pour calculer ce coefficient, il faut en premier lieu quantifier la covariance qui est la moyenne du produit des écarts à la moyenne. Il permet d'analyser les relations linéaires contrairement au coefficient de Spearman qui s'applique aux relations non linéaires monotones. En général, les coefficients de corrélation permettent de donner une mesure synthétique de l'intensité de la relation entre deux variables et de son sens lorsque cette relation est monotone. Un coefficient de corrélation calcule dans quelle mesure ces deux variables tendent à changer ensemble. Le coefficient décrit ainsi l'importance et le sens de la relation. Les matrices de covariance allouent plus de poids aux variables ayant des valeurs élevées. Pour choisir le nombre d'axes à prendre en compte, on a utilisé le critère « absolu » i.e. les axes dont les valeurs propres sont supérieures à un. En effet, par convention, tout facteur ayant une valeur propre initiale supérieure à 1 est réputé comme facteur significatif.

Nous avons procédé à l'évaluation des valeurs propres. Elles sont données par la matrice de variance-covariance. La diagonale de cette matrice fournit les variances des quatre variables considérées. En ACP, on utilise la variance pour prendre en compte la dispersion d'une variable quantitative, alors qu'en général, dans des méthodes statistiques, on utilise l'écart-type. Chaque colonne du tableau 20 (valeurs propres) correspond à une variable virtuelle (ce sont les facteurs) dont la première ligne fournit la valeur propre. Chaque valeur propre représente la variance (mesure de la dispersion) du facteur correspondant. Le facteur, quant à lui, est une combinaison linéaire des variables de départ où les coefficients sont obtenus par les coordonnées des vecteurs propres. La variabilité est le taux de variance de chaque colonne par rapport au total. Le pourcentage cumulé représente le cumul de ces taux (de gauche à droite dans le tableau valeurs propres). La somme des valeurs propres est égale au nombre de variables, à savoir quatre. Nous remarquons que ce sont les deux premiers facteurs qui restituent la presque totalité de la dispersion du nuage de points. Par exemple, le premier axe exprime 55,94 % de la variabilité des données, quant au deuxième il représente 29,65 %. Les deux premiers axes traduisent une bonne représentation de cette variabilité puisqu'ils expriment les 85,6 %. De façon générale, le premier facteur exprimé est le facteur qui montre le plus de variance et constitue donc la combinaison des variables la meilleure.

Analyse en Composantes Principales - Valeurs propres				
	F1	F2	F3	F4
Valeur propre	2,238	1,186	0,351	0,225
Variabilité (%)	55,943	29,651	8,772	5,634
% cumulé	55,943	85,594	94,366	100,000

Tableau 20 : Tableau de valeurs propres

La somme des pourcentages de ces deux composantes nous renseigne sur l'information perdue. Ici, 55,94 augmentés de 29,65 donnent un taux de 85,59 soit une déperdition d'information de 14,41 %.

Corrélations entre les variables et les facteurs :				
	F1	F2	F3	F4
Respiration	-0,855	0,254	0,429	0,147
GSR	0,862	0,362	0,017	0,354
Temperature	0,870	-0,207	0,407	-0,186
CFM	0,087	0,973	-0,031	-0,210

Tableau 21 : Tableau des corrélations

Les coefficients de corrélations variables/facteurs (tableau 21) donnent du sens aux facteurs et permettent leur interprétation. Les nouvelles composantes forment les axes de la cartographie en deux dimensions. La première d'entre elles est celle qui condense le mieux les informations du tableau. Elle constitue l'axe horizontal. La deuxième, d'un pourcentage plus petit, apporte une information complémentaire. Elle représente l'axe vertical.

Les points événements sont représentés en fonction de leurs coordonnées sur les facteurs. Les points les plus proches correspondent à des événements ayant des profils proches quant aux réponses aux variables prises.

Les deux premières colonnes permettent de tracer le cercle des corrélations (figure 109) et de donner une signification aux axes. Les deux dernières colonnes ne sont pas utilisées puisque seules deux dimensions sont retenues pour l'analyse mais il est possible de visualiser le cercle avec toutes

les combinaisons des facteurs (figure 111) un exemple avec des valeurs faibles F3 et F4). Le tableau des corrélations (tableau 21) montre des valeurs positives et négatives, ce qui signifie que les variables varient dans des sens opposés. Elles ont des valeurs faibles (- 0,855), moyennes (0,429) et fortes (0,973).

On peut déjà noter que la GSR et la respiration s'opposent (- 0,855 et 0,862).

F1 et F2 sont les composantes principales ou axes factoriels. Ce sont des combinaisons linéaires des quatre variables. Chacune des composantes rend une partie de l'information de ces quatre variables. Les composantes sont caractérisées par la quantité d'informations qu'elles rendent. Elles sont ordonnées en fonction de cette quantité. Elles sont indépendantes les unes des autres.

Pour déterminer ces composantes des observations définies par les quatre variables vues précédemment, on utilise la matrice de variance – covariance des variables. Variance et covariance sont définies ci-après.

v, la variance est exprimée par

$$v^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x})^2$$

n : nombre d'observations

x_i : variable

$\bar{x}$: moyenne de la variable x

La variance est donc une mesure qui permet de connaître la dispersion des variables autour de la moyenne ou de l'espérance. Une grande variance indique une grande dispersion. On peut calculer l'écart-type σ à partir de la variance.

On aura : $\sigma = \sqrt{v}$

et cov, la covariance est exprimée par

$$cov = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)(x_{i2} - \bar{x}_2)$$

Si x_1 croît quand x_2 croît $cov > 0$

Si x_1 croît quand x_2 décroît $cov < 0$

Si x_1 et x_2 indépendantes $cov = 0$ donc pas de relation linéaire.

La covariance est un réel qui mesure le lien entre deux variables. Elle caractérise les variations entre variables.

Le diagramme (figure 109 cercle de corrélations) représente la projection des variables sur les axes et fournit différentes indications. La longueur des vecteurs renseigne sur la qualité de la représentation des variables. Cette qualité est donnée par le carré de la longueur. Avec une bonne

représentation, le coefficient de corrélation entre les variables est exprimé par le cosinus de l'angle formé par les vecteurs de ces variables. Les variables sont regroupées par significations voisines ou par leur opposition ou encore leur indépendance. L'angle que fait la projection avec un des axes est également lié au coefficient de corrélation. Sur notre cercle, on observe la proximité des variables au cercle. Cela signifie qu'il existe de fortes corrélations. On peut donc prendre en compte nos variables. L'axe horizontal représente plutôt les variables respiration, GSR et température. La première composante est donc liée à ces variables. L'axe vertical représente mieux la variable CFM.

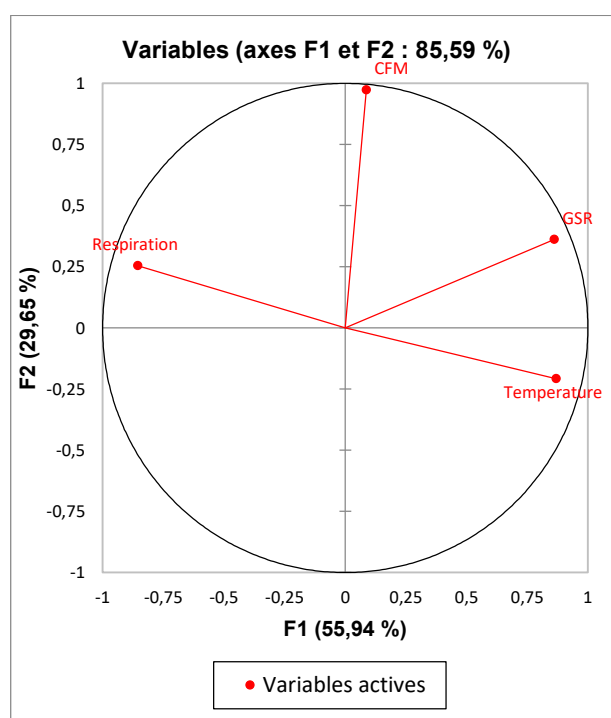


Figure 109 : Exemple de cercle de corrélations

avec les deux facteurs les plus forts F1 et F2

Le tableau suivant exprime les contributions des variables et permet de voir les variables qui jouent un rôle prépondérant dans la représentation des axes factoriels du fait de la valeur plus ou moins élevée du pourcentage.

Tableau 22 : Contributions des variables (%) :

	F1	F2	F3	F4
Respiration	32,637	5,428	52,362	9,573
GSR	33,205	11,066	0,083	55,645
Temperature	33,820	3,615	47,273	15,292
CFM	0,338	79,890	0,282	19,490

La table des cosinus carrés indique la qualité de la représentation des variables par le carré du cosinus de l'angle entre l'axe de projection et le vecteur représentatif de la variable. Plus la valeur est proche de 1, meilleure est la qualité.

Tableau 23 : Cosinus carrés des variables :

	F1	F2	F3	F4
Respiration	0,730	0,064	0,184	0,022
GSR	0,743	0,131	0,000	0,125
Temperature	0,757	0,043	0,166	0,034
CFM	0,008	0,948	0,001	0,044

Les valeurs en gras correspondent pour chaque variable au facteur pour lequel le cosinus carré est le plus grand

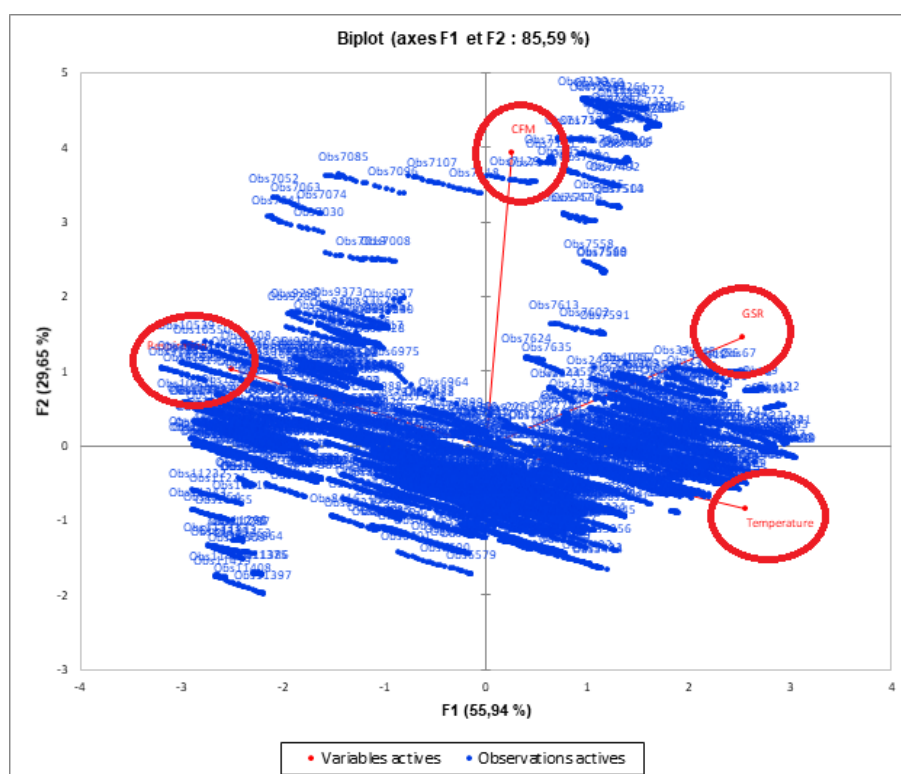
On constate sur ce tableau que les trois premières variables de la première colonne alimentent à elles seules le facteur F1 alors que le facteur F2 est lié à la variable CFM.

La matrice de corrélation ci-après est utilisée pour évaluer la dépendance entre les variables. Il s'agit d'une matrice symétrique avec une diagonale à 1 du fait que la corrélation d'une variable avec elle-même est parfaite. Cette matrice permet de voir rapidement les liaisons entre variables. Par exemple, on observe une indépendance entre le CFM et la température (-0,096) et une dépendance certaine entre la température et la respiration (-0,649).

Tableau 24 : Matrice de corrélation

date	remplacée	Respiration	GSR	Temperature	CFM
date					
remplacée	1	0,748	-0,723	-0,933	0,107
Respiration	0,748	1	-0,585	-0,649	0,126
GSR	-0,723	-0,585	1	0,616	0,354
Temperature	-0,933	-0,649	0,616	1	-0,096
CFM	0,107	0,126	0,354	-0,096	1

Figure 110 : Biplot (axes F1 et F2 : 85,59 %)



Ce diagramme biplot ci-avant montre comment se placent les différentes projections de variables (en rouge) et comment se répartissent les observations (en bleu). Les ellipses rouges signalent les

noms des variables. Compte tenu du nombre important d'observations (15591) la figure est difficilement lisible mais exprime la forme de la répartition.

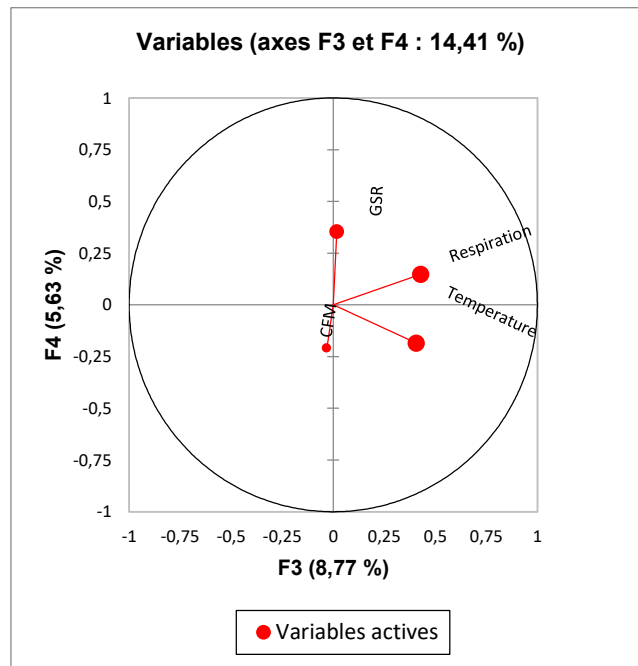


Figure 111 : Exemple de cercle de corrélations

avec les deux facteurs les plus faibles F3 et F4

Ce deuxième exemple de cercle de corrélation exprime bien le fait que les facteurs F3 et F4 sont moins intéressants que F1 et F2. En effet les informations qu'ils représentent sont moindres.

Au vu de ces résultats, nous poussons l'exploration un peu plus loin. Nous utilisons des techniques de classification. Les méthodes de classification opèrent des regroupements en classes. Ces classes regroupent des objets similaires au sein d'un même groupe et dissimilaires dans des groupes différents. Pour bien regrouper, il s'agit d'obtenir une grande similarité intragroupe et une faible similarité intergroupe. L'objectif consiste toujours à trouver des regroupements en fonction des mesures physiologiques et pouvant faire apparaître des motifs liés éventuellement aux états émotionnels d'individus.

4.5.3. Méthodes de classification utilisées

On trouve la technique des k-means ou k-moyennes, la classification ascendante hiérarchique (CAH) et celle des cartes auto adaptatives ou self organizing maps (SOM). Chacune de ces méthodes nous a assistés dans la compréhension des données de façon plus ou moins précise.

4.5.3.1. La technique des k-means et notre contexte

Cette technique est une classification non hiérarchique très utilisée. Il existe plusieurs types de k-means : la méthode des centres mobiles et celle des nuées dynamiques sont les plus connues. Un des inconvénients de cette technique est le choix des classes à déterminer. Nous pouvons nous aider de l'ACP, comme nous l'avons vu, en projetant les données dans un plan et avoir une idée intuitive du nombre de classes. En effet, l'ACP facilite souvent le choix des classes, tout comme l'exécution d'une analyse factorielle permet de détecter les « outliers » (données suspectes ou aberrantes). On procède en général à plusieurs classifications afin de ne retenir que celle qui semble être la meilleure ou s'en approche. Pour cela, on vérifie les valeurs de R^2 ⁽¹³⁴⁾, l'homogénéité des classes ou clusters... Dans cette méthode, le nuage de points est divisé, par itération, en zones, en fonction de la distance des points et de leurs barycentres. En général, c'est le carré de la distance euclidienne qui est appliqué i.e. la matrice d'inertie. La somme des variances intraclasse est ainsi minimisée sachant que la variance est l'inertie si toutes les pondérations sont égales. Le R^2 est le rapport inertie interclasse sur inertie totale. Plus le nombre de classes augmente et plus la valeur R^2 augmente.

Pour résumé, k-means est souvent la généralisation de la moyenne. Le représentant d'une classe correspond ainsi au barycentre des points.

L'algorithme fonctionne comme suit :

On initialise par le nombre de classes k afin de constituer les représentants (centroïdes) de chaque classe qui sont choisis au hasard dans le jeu de données. Pour chaque point de notre nuage de points, on calcule les distances entre le point et les représentants des différentes classes. La distance minimale entre ce point et une des classes est retenue. La classe retenue est affectée à ce point. Puis on met à jour les représentants des classes par le calcul du barycentre. Après maintes itérations, l'algorithme trouve un découpage stable des données. On parle de la convergence de l'algorithme.

Cette technique est sensible aux outliers. C'est une des raisons pour laquelle nous avons prétraité nos données. Nous avons donc appliqué cette méthode sur des données centrées réduites comme pour la technique suivante afin de comprendre et synthétiser nos données physiologiques. Il faut également savoir que la quantification par cette méthode est moins fine que celle que nous verrons plus en détail dans la partie relative aux cartes auto-adaptatives de Kohonen.

¹³⁴ R^2 est le coefficient de détermination. Il donne une idée du pourcentage de variabilité de la variable à modéliser. Plus ce coefficient est proche de 1, meilleur est le modèle.

En revanche, pour construire une segmentation, une classification plus robuste, nous avons utilisé la classification ascendante hiérarchique. C'est la raison pour laquelle nous nous attardons sur cette dernière avant de présenter l'analyse à partir des cartes auto-adaptatives qui a constitué une des deux voies importantes poursuivies dans la thèse. La seconde porte sur la mise en place d'une méthode hybride à base d'estimation-maximisation et de machine à vecteurs de support en tant que méthode de régression (SVR) abordée en 4.5.4.

4.5.3.2. La classification ascendante hiérarchique (CAH) et les données physiologiques

Elle permet de construire une suite de partitions imbriquées des données. L'algorithme fonctionne comme suit :

Au départ, chaque observation ou individu constitue une classe à elle seule. Les distances entre observations ou individus sont calculées deux à deux et les deux plus proches sont assemblées dans une même classe. Le but de cette méthode est de regrouper de façon itérative les observations ou individus sous la forme d'un arbre binaire appelé dendrogramme jusqu'à obtenir une seule classe. Lors de l'utilisation de cette méthode, nous avons fait un choix quant à la distance à définir entre deux groupes. Il existe différentes possibilités appelées saut ou linkage. Le saut de Ward appliqué est celui le plus couramment utilisé et constitue souvent l'opération par défaut dans le cas d'une distance euclidienne entre observations ou individus.

Lors de l'application de l'algorithme, nous avons opté pour le « centré-réduit » afin d'éviter les éventuels problèmes d'échelle des variables sur les résultats. La centration-réduction est une technique de recodage des données qui rend comparable des variables qui ne le sont pas directement du fait de moyennes ou de variances trop différentes. C'est le cas dans notre étude, la fréquence de capture des mesures physiologiques n'est pas identique pour toutes nos variables, nous les avons donc recodées. On a couramment recours à cette technique. Nous n'avons pas choisi le nombre de groupes, il est appliqué une troncature automatique fondée sur l'entropie par défaut. En fonction de nos besoins et connaissances, il est toujours possible d'en changer.

Ce sont les dissimilarités entre les observations qui nous donnent les regroupements dans la CAH. Pour information, l'utilisation du mot objet ou observation est indifférent. Pour illustrer notre propos, nous exposons les résultats suivants avec l'une des expériences sachant que la technique a été appliquée à toutes les expériences :

Un tableau de statistiques des nœuds : on y trouve les informations des nœuds successifs. Le premier nœud a pour indice le nombre d'objets augmenté de 1 (28889).

Noeud	Niveau	Poids	Objets	Fils gauche	Fils droit
22889	17081,195	11445	11445	22885	22888
22888	9024,000	7844	7844	22886	22887
22887	6217,100	7286	7286	22883	22884
22886	1319,680	558	558	22841	22869
...	...	...	...	...	...
11454	0,000	3	3	191	11452
11453	0,000	2	2	186	195
11452	0,000	2	2	185	188
11451	0,000	2	2	184	193
11450	0,000	2	2	159	161
11449	0,000	2	2	151	152
11448	0,000	2	2	135	136
11447	0,000	2	2	121	122
11446	0,000	2	2	106	107

Tableau 25 : Extrait du tableau contenant toutes les valeurs des nœuds

Le dendrogramme ou arbre hiérarchique, outil de visualisation, montre les liaisons entre les classes et également la hauteur des branches indiquant leur proximité. Plus la hauteur de branche est petite plus les classes sont proches. Une classification obtenue par une coupe basse est une classification fine. Une hauteur de coupe est pertinente si elle se trouve entre deux nœuds dont les hauteurs sont « relativement » éloignées.

L'exécution de cette technique peut s'avérer longue lorsque les données sont nombreuses.

Les observations sont agrégées dans les classes qui leur correspondent. La position des nœuds sur l'axe vertical représente la distance à laquelle les classes respectives sont agrégées.

Deux dendrogrammes sont présentés ci-après : l'un est complet et l'autre comporte les classes retenues, au vu des résultats.

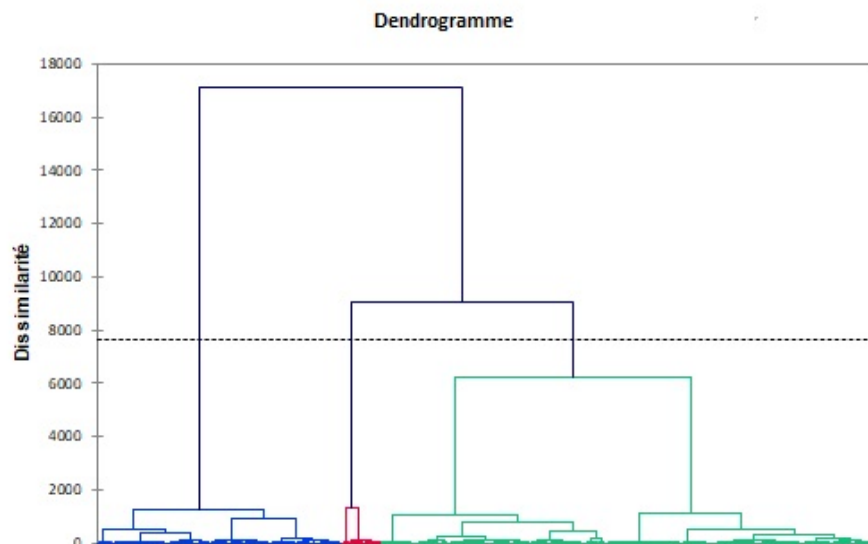


Figure 112 : Représentation du dendrogramme

La ligne en pointillé correspond à la troncature. Elle montre ainsi l'identification de trois groupes homogènes. La coupure est généralement effectuée à l'endroit où les branches sont assez longues. Ce qui est équivalent à la période qui précède une forte perte d'inertie dans le cas de la méthode de Ward dont nous avons parlé précédemment. C'est un niveau où il existe des sauts importants dans les valeurs. Le premier groupe, le plus à droite, est plus homogène que le troisième de par sa constitution. Le premier groupe du dendrogramme est plus plat que les autres. Le deuxième groupe porte un petit nombre d'observations. Le troisième a le plus grand nombre d'observations. Ceci se vérifie dans le tableau des observations centrales.

Le dendrogramme suivant représente le résultat de la troncature faisant apparaître les trois classes.

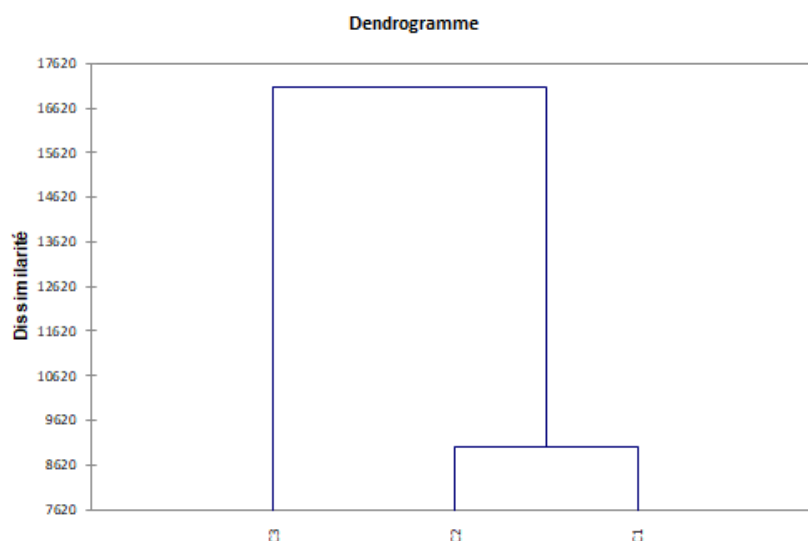


Figure 113 : Dendrogramme simplifié

Le tableau ci-dessous indique la décomposition de la variance afin d'obtenir une classification optimale à l'intérieur des classes et entre les classes. Il apparaît ainsi une valeur qui correspond à la distance moyenne à la moyenne. Cette valeur est indiquée dans la colonne « absolu » et est nommée l'écart absolu moyen. Cette information nous renseigne sur la dispersion des observations. Ici, ce paramètre nous indique que les observations se situent, en moyenne, à 6,14 unités de leur valeur centrale pour l'intra-classe et à 8,6 unités pour l'interclasses. La répartition en pourcentage entre l'intra-classe et l'interclasses est réciproquement de 41,65 % et de 58,35 %. La somme des deux pourcentages donne bien les 100 %.

Variance totale = Variance interclasses + variance intra-classes

L'indice relatif au rapport de la variance intra-classes sur la variance interclasses varie entre 0 et 1.

Ici, il y a une petite différence entre l'intra et l'inter avec un rapport un peu plus fort pour l'inter tendant à montrer que les classes seraient plutôt homogènes.

Tableau 26 : Décomposition de la variance pour la classification optimale

	Absolu	Pourcentage
Intraclasses	6,140	41,65%
Interclasses	8,600	58,35%
Totale	14,740	100,00%

Les tableaux intégrés ci-après sont autant d'informations se rapportant aux observations que l'on cherche à classer.

Dans le tableau 27, on peut lire les coordonnées des barycentres des classes pour les différentes variables. Le barycentre représente le vecteur moyen de chaque classe. Les distances entre les barycentres donnent une information sur les classes et leurs caractéristiques donc sur les observations relatives aux individus dans chaque classe.

Tableau 27 : Un tableau des barycentres des classes

Classe	Respiration	GSR	Temperature	CFM
1	-4,101	-38,329	29,609	67,043
2	-2,536	-37,105	29,134	79,742
3	-2,649	-39,381	28,144	67,970

Les distances euclidiennes entre les barycentres des classes sont inscrites dans le tableau suivant.

Tableau 28 : Un tableau des distances entre barycentres

	1	2	3
1	0	12,862	2,494
2	12,862	0	12,032
3	2,494	12,032	0

Dans le tableau 29, on trouve les coordonnées de l'élément le plus proche du barycentre de la classe et ce pour chaque classe.

Tableau 29 : Un tableau des observations centrales

Classe	Respiration	GSR	Temperature	CFM
1 (2990)	-4,100	-38,388	29,705	67,000
2 (7468)	-2,930	-36,762	29,017	80,000
3 (9112)	-2,665	-39,302	28,191	68,000

Les distances entre les observations représentent les distances euclidiennes entre les objets centraux des classes pour les différentes variables (tableau 30).

Tableau 30 : Un tableau entre les observations centrales

	1 (2990)	2 (7468)	3 (9112)
1 (2990)	0	13,171	2,487
2 (7468)	13,171	0	12,297
3 (9112)	2,487	12,297	0

Le tableau 31 récapitule les statistiques descriptives des classes au niveau des objets, des poids, variance, distances et permet de donner sa classe d'affectation à chaque objet dans l'ordre initial des observations. Les éléments placés sous la barre du tableau correspondent à la répartition des observations dans chaque classe.

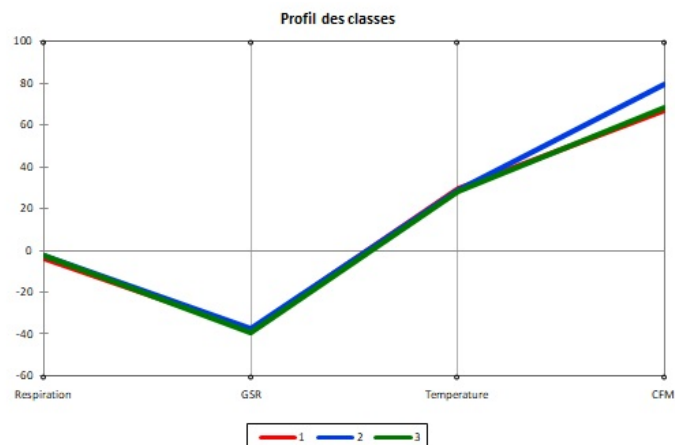
Tableau 31 : Des résultats par classe

Classe	1	2	3
Objets	7286	558	3601
Somme des poids	7286	558	3601
Variance intra-classe	5,223	10,422	7,331
Distance minimale au barycentre	0,121	0,594	0,098
Distance moyenne au barycentre	2,017	2,758	2,199
Distance maximale au barycentre	8,127	8,098	8,030
	23	7019	7725
	24	7020	7726
	25	7021	7727
	26	7022	7728
	...	...	...

On constate, par exemple, que la classe 1 a capté plus d'objets que la classe 2.

Tout comme le dendrogramme, le diagramme, appelé profil des classes, montre les 3 classes retenues et constitue un résultat graphique du tableau des observations centrales. Ce résultat affiche la façon dont les variables physiologiques impactent chacune des classes. Il s'agit du profil évolutif des classes obtenues en fonction des observations.

Figure 114 : Profil des classes



Pour affiner ce travail et améliorer la compréhension de la classification des données obtenues par les procédés ci-dessus, nous avons poursuivi l'analyse à l'aide des cartes auto-adaptatives.

4.5.3.3. La technique de self organizing map (SOM)

L'algorithme de Kohonen, comme nous l'avons vu, est un système d'apprentissage non supervisé compétitif. Il permet la réduction de la dimensionnalité en préservant la géométrie des données. Les observations initiales similaires sont projetées dans le même neurone ou dans des neurones proches. La notion de voisinage est primordiale dans SOM. Les SOM peuvent être perçues comme une version contrainte des nuées dynamiques (k-means) offrant un traitement pour un plus grand nombre de données. C'est un raffinement de la technique des k-means. On cherche donc à assigner à un cluster des valeurs proches en utilisant une mesure de distance. Ceci revient à minimiser la fonction qui mesure la dispersion intra-cluster relative à chaque groupe.

L'algorithme fonctionne comme suit :

Au départ, il y a initialisation des poids de nœuds du réseau de manière aléatoire. En effet, il faut bien démarrer le processus, l'apprentissage se chargera de faire converger les poids vers leur véritable valeur. C'est la phase d'initialisation.

Une observation ou un individu est sélectionné de façon aléatoire dans l'ensemble de données de départ. Tous les individus ou observations de base vont passer par cette sélection au moins une fois. Le nœud le plus proche, appelé nœud gagnant, est déterminé. C'est la phase de compétition. Les poids du nœud sont mis à jour. C'est la phase d'apprentissage. Puis, on évalue le voisinage du neurone gagnant et les poids des nœuds de la carte sont mis à jour. L'adaptation est d'autant plus forte que les neurones sont voisins. C'est la phase de coopération.

On constate à ce niveau que la taille du voisinage examiné devient de plus en plus petite au fur et à mesure que l'on avance dans l'apprentissage. L'intensité de la mise à jour est réduite petit à petit par la variable d'apprentissage, encore appelée pas de l'apprentissage. Ce pas contrôle la vitesse d'apprentissage. Si ce pas est trop grand, il y a un risque d'instabilité. Si ce pas est trop petit, le modèle ne s'adapte pas assez aux données. Les conditions de convergence vont être fonction des valeurs de l'écart-type et du pas. Il est conseillé de choisir des valeurs assez grandes au départ et les réduire progressivement ensuite.

La sélection du neurone le plus proche représenté par X, sur la figure 115 ci-après, est opérée. Le schéma illustre les phases d'apprentissage et d'adaptation de la carte au fur et à mesure des itérations.

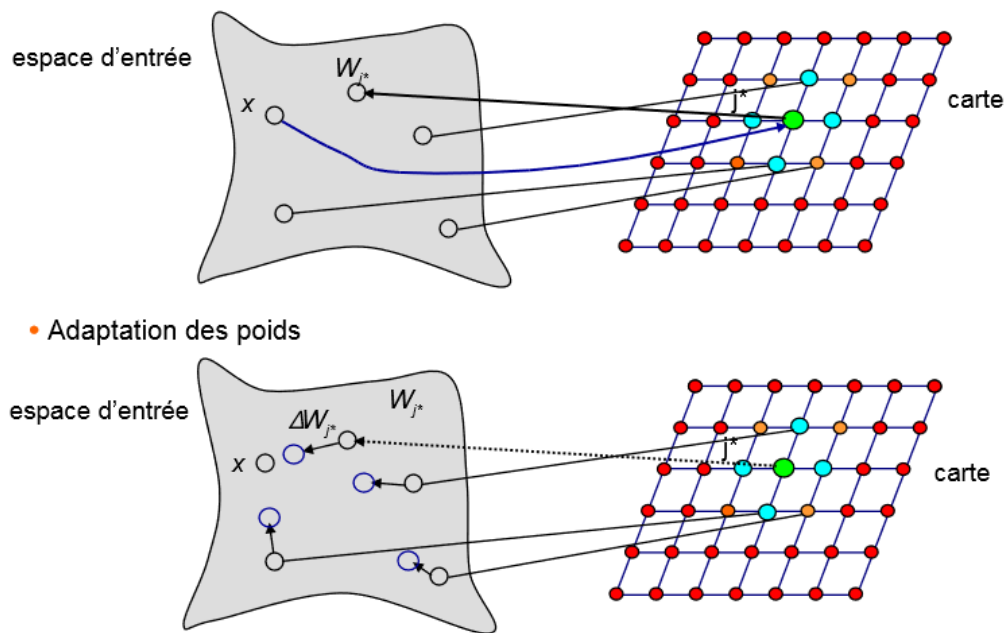


Figure 115 : Interprétation de l'algorithme de Teuvo Kohonen¹³⁵

W = poids

J^* = neurone ou nœud gagnant

X = vecteur d'entrée (représentant nos variables)

« Les poids du nœud gagnant j^* » (en vert) « et de ses voisins » (en bleu et orange) sont rapprochés plus fortement du vecteur d'entrée X . L'amplitude de l'adaptation est fonction de la distance du neurone au neurone gagnant (flèches de longueurs différentes) ». Nous le remarquons au niveau de l'espace d'entrée dans la deuxième partie de la figure 115.

4.5.4. La technique SOM appliquée à nos données

Nos différentes étapes avec Kohonen et interprétation des résultats

Le travail sur les données physiologiques à partir des cartes auto-organisatrices de Kohonen s'est déroulé comme suit, par itérations successives :

- Sélection de sous-ensembles de données, panels représentatifs des participants

12 fichiers ont été retenus sur les 67 dont 4 ont été écartés pour des raisons d'aberrations ne pouvant pas faire l'objet de techniques de compensation. En effet, il s'agit sans doute de dysfonctionnement

¹³⁵ <http://slideplayer.fr/slide/1619081/> - Vincent Lemaire – consulté le 4 avril 2018

de capteurs engendrant la perte presque totale de données pour une ou plusieurs variables. Un ensemble de fichiers non utilisé dans l'immédiat est conservé afin de pouvoir ensuite valider nos méthodes.

Les 8 fichiers retenus concernent 6 personnes différentes. 5 d'entre-elles ont réalisé la même expérience F, 2 la même expérience N et 1 ayant réalisé 3 expériences différentes F, N et S.

- Analyse fichier par fichier
- Analyse des 8 fichiers concaténés
- Analyse des 5 fichiers relatifs à la même expérience et des individus différents
- Analyse des 3 fichiers concernant un même individu et 3 expériences différentes (2 exemples)
- Analyse de 11 fichiers avec comparaison à l'analyse des 8 fichiers

Les étapes précédentes, comme la partie prétraitement, ont été gardées. Les fichiers, tableaux, matrices sont dépourvus de données manquantes. Les données sont centrées-réduites pour les raisons que nous avons évoquées.

Nous avons appliqué la fonction Kohonen, dans l'outil Xlstat, à chacun des fichiers et aux huit fichiers concaténés. Pour chaque fichier nous avons déterminé les paramètres les plus appropriés à partir des données prétraitées. Nous avons effectué des essais successifs afin de déterminer la bonne dimension de la carte (le nombre de neurones), le pas de l'apprentissage (le taux d'apprentissage) et le nombre d'itérations. Nous avons fixé différents pas, servant au contrôle de la convergence de l'algorithme, que nous avons comparés. Le taux d'apprentissage est compris entre 0 et 1. Plus ce taux est proche de 1 et plus on risque de ne pas avoir une bonne convergence des poids. Dans le cas où le taux est petit, il est possible de se rendre compte que la convergence n'aboutit pas ou trop lentement impliquant un très grand nombre d'itérations. C'est donc une affaire d'estimation. Le nombre d'itérations est arrêté grâce à la visualisation de la courbe d'apprentissage. La courbe devient stable lorsqu'on obtient une droite proche et parallèle à l'axe des abscisses sinon il faut relancer l'exécution avec un nombre plus grand de périodes de présentation.

Avec les variations du pas, du nombre de neurones et du nombre d'itérations appliqués séparément puis combinés, nous avons pu fixer nos paramètres jusqu'à l'obtention d'une stabilité engendrant les prises de décisions. Nos propos sont illustrés par un exemple de chaque cas d'analyse exécuté. Nous avons tout d'abord adopté l'outil Xlstat, comme indiqué précédemment, puis, pour plus de souplesse de programmation, R s'est imposé. Toutes les premières analyses (fichiers isolés et huit fichiers concaténés) ont été effectuées à l'aide des deux logiciels. Les analyses suivantes ont été

réalisées uniquement avec R. Notre objectif est toujours de trouver des motifs récurrents dans les observations en fonction des mesures physiologiques.

Présentation de l'analyse d'un fichier isolé

Dans le cadre des fichiers isolés, l'apprentissage est assez rapide, la quantité de données étant moindre.

L'outil Xlstat nous a offert un bon aperçu de l'apprentissage pour chaque fichier. Les représentations ci-dessous traduisent respectivement les synthèses de processus d'apprentissage suivant différents paramétrages. Nous avons en réalité mené une investigation plus large quant aux paramètres et ne soumettons ici qu'une représentation de l'éventail pour éviter la surcharge. Pour un fichier donné, il a été appliqué les paramètres suivants sur une carte de 400 neurones soit une grille de 20 par 20 :

- Premier cas : taux d'apprentissage de 0,05 à 0,01 et un nombre d'itérations allant de 100 à 1000 en passant par 500
- Deuxième cas : taux d'apprentissage de 0,5 à 0,01 et un nombre d'itérations allant de 100 à 1000 en passant par 500
- Troisième cas : taux d'apprentissage de 0,8 à 0,01 et un nombre d'itérations allant de 100 à 1000 en passant par 500

Pour chaque cas, le programme SOM a été lancé trois fois avec des temps d'exécution plus ou moins longs en fonction du nombre de données, d'itérations, du pas ...

Pour information, les cartes sont orientées nord sud et ouest est comme les cartes géographiques. Elles se lisent de bas en haut et de gauche à droite. Le neurone n°1 est tout en bas à gauche et le neurone 400 est tout en haut à droite.

Les courbes d'apprentissage obtenues sont en annexe 1 (courbes d'apprentissage (chapitre 4)). On constate que le premier cas affiche un apprentissage rapide du fait du petit pas et est moins bon que le deuxième cas qui offre un apprentissage plus lent et plus précis. Quant au troisième cas, encore plus lent que le deuxième, ne fournit pas d'informations complémentaires. Le nombre d'itérations retenues dans cette configuration est celui de 500 avec le taux de 0,5. Il procure le meilleur résultat en matière de distance moyenne des observations aux vecteurs référents. Cette distance est en effet la plus petite indiquant une grande proximité.

La visualisation des données est également soutenue par différentes représentations. Il est des graphiques comme la répartition des observations dans les nœuds nommés « counts » ou « node counts » ou « counts plot », comme la représentation de chaque variable dans chaque nœud appelée « codebook vectors » ou « codes » ou « codes plot ». Il est facile aussi d'illustrer la

distance entre chaque nœud et ses voisins, la qualité des nœuds par rapport à la distance qui les sépare ... En annexe 2 (codes plot (chapitre 4)), sont présentés les cartes dites de « codebook vectors ». En annexe 3 (counts plot (chapitre 4)), nous trouvons les cartes « counts plot ». Ces résultats visuels sont le résultat de l'exécution de l'algorithme de Kohonen.

En ce qui concerne l'annexe 2 (codes plot (chapitre 4)), les graphiques représentent les 400 nœuds comme précédemment où apparaissent les contributions des variables. Chaque portion d'un nœud correspond à l'une des quatre variables et se distingue par sa couleur. Il est à noter que l'impact des variables est visible sur les différentes cartes quels que soient les cas. Prenons l'exemple de la GSR (réponse galvanique de la peau) en jaune dans le premier cas. Cette variable contribue fortement aux neurones se situant au centre nord de la carte associée à une combinaison plutôt marquée avec la température et la CFM (fréquence cardiaque). Cette analyse montre d'éventuelles corrélations que nous avons déjà soulevées avec les méthodes factorielles. Ceci est intéressant à exploiter car la combinaison de certaines mesures physiologiques ou plus exactement leurs variations peuvent correspondre à un événement particulier s'étant produit pendant l'expérience. Nous y reviendrons.

L'annexe 3 propose une représentation du nombre d'instances dans chaque nœud de la carte. Une échelle est donnée par les couleurs du moins dense au plus dense allant du rouge au blanc en passant par l'orange et le jaune. La coloration en gris signifie que le neurone n'a rien capté. Ces cartes permettent de voir comment se répartissent les observations soit de manière assez homogène ou bien par zone de concentration. Le nombre de neurones gris peut indiquer que la dimension de la grille n'est pas tout à fait adaptée. A ce niveau, il est encore nécessaire d'approfondir l'exploration.

L'analyse des fichiers isolés est une première approche de compréhension des données et n'est pas suffisante pour répondre à nos questionnements. En effet et pour rappel, nous sommes en recherche de motifs dans les observations. Existe-t-il des motifs qui se reproduisent chez un individu ou chez plusieurs individus ? Il nous faut pousser l'étude plus loin en combinant les observations de plusieurs d'entre eux.

Présentation de l'analyse des huit fichiers concaténés

Les huit fichiers analysés ont été concaténés en un seul. Il contient les mesures physiologiques de 6 individus ayant participé à des expériences similaires ou non soit environ 1 250 000 données.

L'outil Xlstat a aidé à se familiariser avec les cartes de Kohonen. Les paramètres retenus, après maints essais, sont un nombre d'itérations égal à 1 000, un taux d'apprentissage allant de 0,5 à

0,01, une carte de dimension 20 par 20 et une topologie hexagonale. Ceci se traduit par les trois figures placées en annexe 4 (graphiques Xlstat ... (chapitre 4)) illustrant la courbe d'apprentissage (training progress) avec une stabilisation de l'apprentissage aux alentours de 910, (codes plot).

La programmation sous R a permis d'affiner et de définir de façon plus précise le paramétrage des cartes. Les figures ci-après montrent les résultats obtenus. La courbe d'apprentissage affiche un nombre d'itérations de 100 avec une stabilité de la carte aux alentours de 91 représentant un rapport de 10 avec l'outil Xlstat. Les autres paramètres restent inchangés. Les résultats obtenus sont plus fins et plus précis qu'avec l'outil Xlstat comme l'exhibe la carte des neurones, figure ci-dessous.

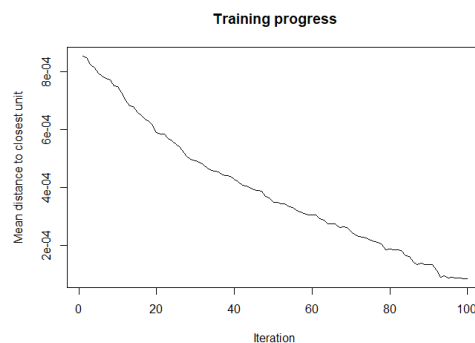


Figure 116 : Courbe d'apprentissage

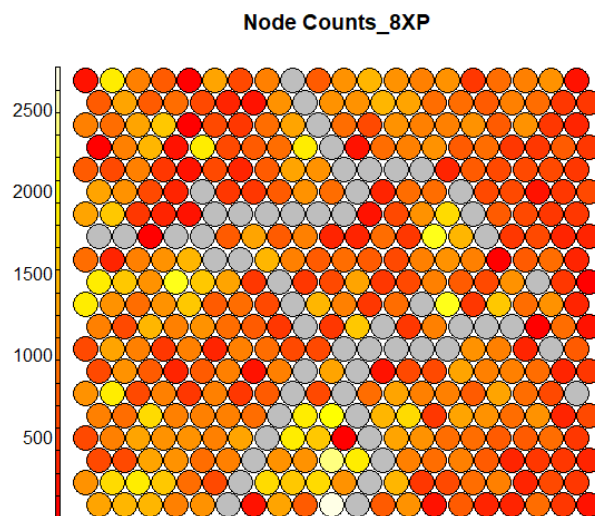


Figure 117 : Carte 20 x 20 des nœuds

La carte montre une répartition des observations en zones plus nettes que dans celle fournie par Xlstat. On constate six zones. Les neurones gris font comme une délimitation de ces zones. Il est venu le temps d'inspecter ces différentes parties. Les éléments se projetant dans les secteurs révélés correspondent-ils à des observations particulières, à des moments singuliers ... ?

L'apprentissage de cette carte s'est faite grâce aux huit fichiers relatifs à six sujets. Six sujets, six zones ? Essayons de comprendre ce que signifie cette disposition. Pour commencer, nous projetons

chacun des individus sur la carte apprise afin d'étudier leur comportement respectif. Les résultats obtenus sont en annexe 5 (carte d'apprentissage des 8 fichiers ... (chapitre 4)). On constate que chaque individu se projette dans une zone de la carte correspondant aux zones découvertes et délimitées par les neurones gris. Ceci pourrait vouloir dire que chaque zone correspond à un type d'individu. Il est encore un peu prématuré pour avancer quoi que ce soit. C'est juste un petit progrès qui doit être de nouveau exploré.

Afin de poursuivre notre analyse, nous avons souhaité projeter un autre sujet ayant pris part à trois expériences communes aux autres participants. Le résultat est reporté dans l'annexe 6. On constate que la projection sur la carte apprise des huit fichiers est plus éparse mais se distribue sur une zone typique et relativement bien délimitée. Cet individu aurait-il des similitudes avec plusieurs autres sujets ou bien se projette-t-il dans une zone propre ? Attention, il est à noter que ce sujet n'est pas dans les huit fichiers, donc n'appartient pas à la carte apprise. Nous voulons simplement observer son comportement par rapport aux autres.

Dans les huit fichiers dont nous venons de discuter, nous avons plusieurs individus et plusieurs expériences. Examinons ce que les données nous offrent en sélectionnant parmi les huit fichiers, cinq d'entre eux, relatifs à une même expérience.

Présentation de l'analyse des cinq fichiers concaténés

Nous étudions à présent les cinq fichiers en relation avec une même expérience. Dans cette analyse, nous avons concaténé les observations de cinq sujets. Nous avons lancé les mêmes algorithmes qu'avant. Les cartes produites sont disponibles à l'annexe 7 (étude avec les cinq fichiers ... (chapitre 4)). Nous constatons que la carte SOM exprime cinq zones. Nous vérifions, comme dans les huit fichiers considérés, que chaque sujet se projette dans un secteur distinct, semblant indiquer une reconnaissance de types d'individus.

Présentation de l'analyse des trois fichiers complémentaires

Dans les huit fichiers se trouve une personne ayant fait trois expériences : F, N et S. On a pu voir que la projection de cette personne quelle que soit l'expérience occupe une zone particulière. Cela pourrait signifier que chacun de nous dispose de caractéristiques spécifiques en matière de signaux physiologiques qui constituent une identité.

Nous avons souhaité nous confronter à cette hypothèse en choisissant un individu n'appartenant pas à notre sélection de départ et ayant lui-même participé aux mêmes trois expériences. Il s'agit de l'individu présenté en annexe 6 (projection d'un nouvel individu ... (chapitre 4)).

Nous l'avons maintenant intégré aux huit fichiers précédents afin de disposer d'un fichier unique contenant onze fichiers, les huit déjà étudiés et les trois nouveaux relatifs à un nouveau sujet tiré des fichiers conservés pour valider nos modèles, que nous appelons le septième individu.

Présentation de l'analyse des onze fichiers concaténés

Le questionnement sur le septième individu quant à son appartenance à une zone couverte par d'autres individus ou uniquement par lui-même nous pousse de nouveau à réaliser une carte SOM à partir des onze fichiers. Cela nécessite un nouvel apprentissage de la carte et la projection individuelle des sujets. La visualisation de l'exécution des programmes décrivant le bilan est placée en annexe 8 (visualisation bilan ... (chapitre 4)). Il nous conforte dans les premières réflexions à savoir que chaque individu se projette dans une zone spécifique. Nous sommes donc encouragés à aller plus avant.

Nous allons maintenant étudier chaque neurone et essayer de comprendre ce qui se produit au niveau de leur position sur la carte. Au fil du déroulé des expériences comment passe-t-on d'un neurone à l'autre ? Existe-t-il des sauts importants, y a-t-il des relations soutenues entre certains neurones ? Dans l'affirmative, cela signifierait qu'un phénomène est observé. Pour le comprendre, nous allons mettre en regard ces éléments et les événements produits dans les différents supports d'expérience.

Pour illustrer la réponse à ces questions dans ce chapitre, nous avons choisi un des individus ayant réalisé les expériences F, N et S. Il est à la fois dans les huit fichiers concaténés et dans les onze autres fichiers. Il est bien entendu que l'analyse s'est faite pour tous les participants.

L'observation des mouvements d'un neurone à un autre dévoile certaines particularités correspondant à des sauts, c'est-à-dire le passage d'un neurone à un autre plus ou moins éloigné. Nous parlerons de grand saut lorsque les deux neurones sont très éloignés, de saut moyen lorsqu'une distance plus petite les sépare et de petit saut quand ils sont proches. Faisons un zoom au niveau de la partie correspondant à la projection de l'individu choisi sur la carte apprise des huit fichiers (figure 118). Cette illustration montre les éloignements plus ou moins grands ou les proximités des neurones.

Nous avons dans un premier temps considéré les neurones les plus éloignés apparaissant dans les résultats d'expériences. De façon plus concrète, prenons l'extrait relatif au tableau ci-après, nous voyons par exemple dans la dernière colonne du tableau les numéros des neurones. Dans cet extrait, le plus grand saut est le passage du neurone 103 au neurone 21, un saut moyen est matérialisé par le passage du neurone 107 au neurone 147 et le petit saut s'exprime entre le neurone 108 et le neurone 128. Les neurones 108 et 128 sont voisins tout comme 107 et 108. Ce qui nous

a guidé pour établir ces sauts, ce sont les réactions liées aux événements qu'il a fallu examiner en détails. Nous avons également considéré les allers-retours d'un neurone a à un autre b ou d'un neurone a à un voisin attenant à b.

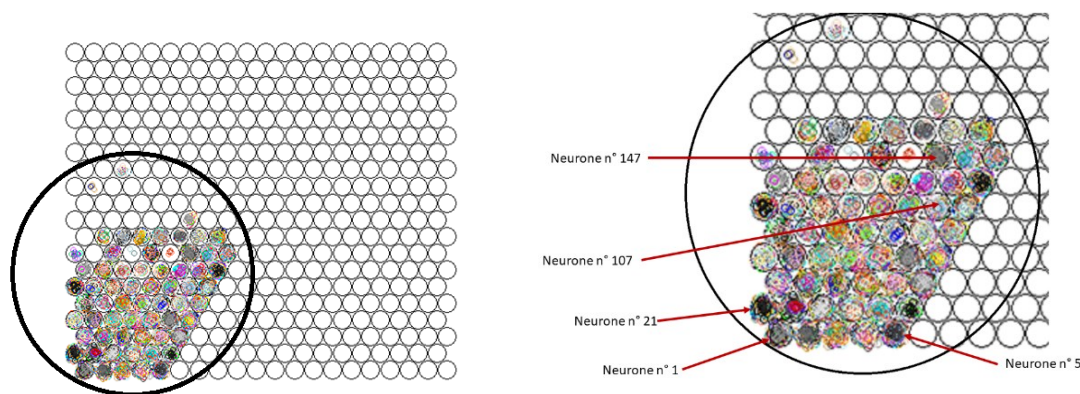


Figure 118 : Représentation de la projection d'un individu sur la carte avec zoom

Nous avons au fil des analyses recueillies les informations suivantes conservées dans des fichiers. Ci-après figure un extrait.

Le tableau complet nous apporte de nombreuses autres comparaisons possibles et informations complémentaires telles que le passage incessant du neurone 103 au neurone 21 et vice-versa qui correspond à des bruits inattendus dans un milieu anxiogène qu'est l'expérience. Des grands sauts de neurones se produisent en particulier lorsque l'avatar du participant se trouve confronté à l'apparition de l'entité létale, à la transition de l'écran en rouge annonciatrice de la fin ou encore au son déclenché lors de la fin de vie de l'avatar. Les différents éléments, événements sont faciles à retrouver car on peut noter, dans le tableau 32, la date exacte de leur production. Cette date est aussi conservée au niveau des différentes expériences et il suffit de les mettre en relation. Pour chaque observation, pour chaque neurone, nous sommes capables de fournir l'événement produit. Toutes ces informations constituent des éléments précieux qui précisent comment chaque participant réagit à différents événements physiologiquement, nous donnant un comportement, une sorte d'état selon les stimuli perçus.

dates	Respiration	GSR	Temperature	CFM	Individu	som_model _8XP_conca t.distances	som_model _8XP_conca t.unit.classi f
03/03/2014 12:12:07.429	-4,193	-41,204	22,148	59	1_S	0,04706752	128
03/03/2014 12:12:07.460	-3,897	-41,141	22,148	59	1_S	0,03847998	128
03/03/2014 12:12:07.492	-3,569	-41,079	22,148	59	1_S	0,03177506	128
03/03/2014 12:12:07.523	-3,25	-41,016	22,148	59	1_S	0,02768636	128
03/03/2014 12:12:07.554	-2,961	-40,953	22,148	59	1_S	0,02351804	108
03/03/2014 12:12:07.585	-2,735	-40,891	22,148	59	1_S	0,01957516	108
03/03/2014 12:12:07.617	-2,509	-40,816	22,148	59	1_S	0,01662901	108
03/03/2014 12:12:07.648	-2,282	-40,753	22,148	59	1_S	0,01604449	108
...	...	...	...	...	...	...	...
03/03/2014 12:12:07.773	-1,588	-40,728	22,148	59	1_S	0,0265735	108
03/03/2014 12:12:07.804	-1,339	-40,716	22,148	59	1_S	0,02817236	107
03/03/2014 12:12:07.835	-1,19	-40,716	22,148	59	1_S	0,02610531	107
03/03/2014 12:12:07.867	-1,073	-40,703	22,148	59	1_S	0,02416761	107
...	...	...	...	...	...	...	...
03/03/2014 12:12:07.992	-1,112	-40,691	22,148	59	1_S	0,02409115	107
03/03/2014 12:12:08.023	-1,183	-40,691	22,148	59	1_S	0,02493565	107
03/03/2014 12:12:08.054	-1,3	-40,678	22,148	60	1_S	0,02179206	147
03/03/2014 12:12:08.085	-1,417	-40,678	22,16	60	1_S	0,02383433	147
03/03/2014 12:12:08.117	-1,588	-40,678	22,148	60	1_S	0,02707693	147
03/03/2014 12:12:08.148	-1,697	-40,666	22,148	60	1_S	0,02572165	128
...	...	...	...	...	...	...	...
03/03/2014 12:12:25.429	-1,424	-41,066	22,26	53	1_S	0,01604512	103
03/03/2014 12:12:25.460	-1,471	-41,066	22,248	53	1_S	0,01695126	103
03/03/2014 12:12:25.492	-1,518	-41,066	22,26	53	1_S	0,01814807	103
03/03/2014 12:12:25.523	-1,549	-41,066	22,26	53	1_S	0,0186494	21
03/03/2014 12:12:25.554	-1,588	-41,066	22,26	53	1_S	0,01816887	21
03/03/2014 12:12:25.585	-1,666	-41,066	22,248	53	1_S	0,01733693	21
...	...	...	...	...	...	...	...
03/03/2014 12:12:23.867	-2,267	-41,016	22,248	54	1_S	0,01169292	86
03/03/2014 12:12:23.898	-2,197	-41,016	22,26	54	1_S	0,01151631	86
03/03/2014 12:12:23.929	-2,095	-41,016	22,248	53	1_S	0,01593505	21
03/03/2014 12:12:23.960	-2,017	-41,028	22,248	53	1_S	0,01581976	21
...	...	...	...	...	...	...	...
03/03/2014 12:12:24.148	-1,573	-41,028	22,26	53	1_S	0,01953788	21
03/03/2014 12:12:24.179	-1,502	-41,028	22,248	53	1_S	0,01834627	103
03/03/2014 12:12:24.210	-1,385	-41,028	22,26	53	1_S	0,01590984	103
...	...	...	...	...	...	...	...

Tableau 32 : Extraction d'un tableau contenant les informations liées à huit individus

Grâce aux cartes de Kohonen, nous avons pu mettre en évidence plusieurs points importants quant à la relation entre les données physiologiques et les individus. Le croisement de toutes les analyses nous montre qu'il existe des classes pouvant représenter des types de personnes, que les sauts de neurones matérialisent des événements significatifs pour les participants, avec des changements d'états. Néanmoins, il faut continuer l'étude en poussant encore plus loin les investigations tant du point de vue de l'exploration de la méthode que dans les résultats comportementaux et émotionnels. En ce qui concerne cette dernière partie, nous devons poursuivre avec tout le matériel

dont nous disposons : les différents enregistrements (fichiers détaillés associant événements précis des expériences au cours du temps, vidéos des expressions faciales et comportements des individus ...), les données relatives aux neurones ... Pour ce qui est de l'évolution de la méthode, nous avons lancé une investigation du côté des chaînes de Markov cachées (MMC ou hidden Markov Model (HMM) où les états sont inconnus de l'utilisateur (seul certains paramètres sont connus). Cette investigation pourrait peut-être converger davantage vers l'évolution de notre deuxième modèle.

4.5.5. Notre technique hybride EMDeep

Tout en explorant la voie des cartes auto-organisatrices, nous avons mené une autre étude d'apprentissage non supervisée. En effet, il existe d'autres techniques comme indiqué dans le schéma de classification non supervisée de (Hajjar, 2014). L'approche probabiliste est une voie à visiter qui vient en complément de notre première direction qui a été combinée à d'autres méthodes. Il s'agit d'établir une classification automatique des individus en groupes homogènes i.e. s'appuyant sur une analyse probabiliste et non géométrique. Nous proposons un modèle hybride fondé sur un modèle d'apprentissage profond conçu avec un algorithme d'estimation maximisation (EM) et une technique à vecteurs support (SVR). Nous présentons ci-après de façon succincte les concepts nécessaires à la compréhension et expliquons notre approche. Le détail est dans (Gal, Banerjee, Rad 2019).

Le modèle de mélange et son application

Reprenons nos éléments de départ qui sont des données physiologiques pour lesquelles nous ne disposons d'aucun label relatif aux émotions ou états émotionnels que nous souhaitons découvrir au travers de patrons que nous cherchons à identifier. Dans notre étude, ces données proviennent de différentes sources à savoir plusieurs individus pouvant constituer des sous-populations homogènes, nommées composants. L'ensemble de ces sous-populations est donc un mélange pour lequel nous cherchons à comprendre sa distribution, la façon dont les données se regroupent ou pas. Un outil utilisé pour faire de la classification dans cette situation est le modèle de mélange et plus particulièrement le modèle de mélange gaussien (GMM – Gaussian Mixture Model). Cette technique s'applique lorsque la structure des données est supposée composée de plusieurs groupes et qu'une simple distribution gaussienne ne peut la représenter. Ce qui est notre cas.

N'oublions pas que nous cherchons à établir un lien entre la combinaison des variables physiologiques et des états émotionnels que nous ne connaissons pas. Nous supposons que l'information globale Y se trouve dans les données. Une partie de l'information est connue, observable et une partie est cachée, inconnue. Nous noterons l'ensemble de nos données comme suit :

- La partie visible ou ensemble des variables observées ou données incomplètes : X
- La partie invisible ou ensemble des variables cachées : Z .

Si des motifs existent, ils sont contenus dans les données complètes.

Afin d'aborder le GMM, il faut savoir que le modèle de mélange est un modèle probabiliste qui permet l'estimation de la fonction de densité (distribution) des variables par modélisation à l'aide d'une somme de plusieurs autres distributions plus simples. L'objectif est donc de modéliser des échantillons de données afin de réaliser soit de la prédiction ou de l'apprentissage distribuée ou encore de l'affectation floue.

Le modèle de mélange gaussien, quant à lui, repose sur la distribution gaussienne i.e. la loi normale. C'est la distribution la plus répandue parmi les distributions probabilistes pour la modélisation des variables aléatoires continues. Les modèles de mélange gaussien sont très utilisés dans la reconnaissance d'images (Goldberger, 2003) ou audio (Reynolds, 2000). Nous l'appliquons à nos variables physiologiques.

Afin d'estimer les paramètres du GMM, la technique la plus adoptée est l'algorithme Estimation Maximisation (EM). Et la méthode couramment exploitée pour estimer les paramètres de distribution de probabilités d'un échantillon est le maximum de vraisemblance. La vraisemblance quantifie la probabilité que les observations proviennent bien d'un échantillon de la loi de probabilité étant donné un échantillon observé et la loi de probabilité associée. Estimer un paramètre par la technique du maximum de vraisemblance (likelihood maximization) est ainsi équivalent à proposer comme valeur de ce paramètre une valeur qui rend maximale la vraisemblance donc la probabilité d'observer les données comme réalisation d'un échantillon de cette loi. On pourrait comparer cela à une régression linéaire où on cherche à identifier les paramètres a et b d'une équation de type $y = ax + b$. Dans notre situation plus complexe, ce ne sont pas les paramètres d'une droite mais ceux d'une loi normale. Pour rappel, la loi normale s'exprime sous la forme de la fonction suivante :

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{(-\frac{1}{2})\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

où μ = espérance (centre de la courbe) = moyenne

et σ = vraisemblance (sa largeur) = écart-type

Lorsqu'une variable aléatoire X suit cette loi, on dit qu'elle est normale ou gaussienne et on utilise la variance pour l'exprimer, soit : $X \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$. La courbe de cette densité est la courbe de Gauss ou courbe en cloche.

Le principe du maximum de vraisemblance part de l'hypothèse que la variable d'intérêt suit une loi de probabilités. Les paramètres inconnus Θ caractérisant cette loi sont les paramètres que l'on cherche à estimer. La fonction de vraisemblance correspond au produit des probabilités dans le cas discret et au produit des densités dans le cas continu. Ce qui s'applique à nos données. On utilise plutôt le logarithme de la vraisemblance, cela permet de transformer le produit de la fonction de vraisemblance en somme, rendant les calculs plus simples.

Le maximum de vraisemblance consiste à maximiser de la façon suivante :

Etant donnés Θ , X , f_k et Θ_k où

$X = (X_1, \dots, X_n)$ = échantillon = réalisations de n variables aléatoires = observations $x_1, \dots, x_n$

Θ_k = paramètre de distribution de la population $k = (\mu_k, \sigma_k)$ (voir loi normale présentée plus haut)

$\Theta = (\Pi_1, \dots, \Pi_K, \Theta_1, \dots, \Theta_K)$ = paramètre global du mélange inconnu du modèle paramétrique. Il faut trouver le meilleur paramètre possible, la meilleure estimation.

Π_k et Θ_k : caractéristiques à découvrir

$f_k(\cdot, \Theta_k)$ = fonction de répartition gaussienne de densité = fonction de répartition à partir de laquelle le mélange est formé = densité du k ème composant du modèle paramétrique

on a :

$$L(\Theta, X) = \prod_{i=1}^n \sum_{k=1}^K \Pi_k f_k(X_i, \Theta_k)$$

se traduisant par, avec l'application du logarithme

$$l(\Theta, X) = \sum_{i=1}^n \log \left(\sum_{k=1}^K \Pi_k f_k(X_i, \Theta_k) \right) \text{ qui permet d'estimer le paramètre inconnu.}$$

Tout d'abord, il faut répartir les individus dans les populations ou groupes allant de 1 à k , appartenant à l'ensemble $\{K\}$. Ensuite, il faut définir la distribution dans chaque population f_k .

Nos données sont distribuées dans K populations. On a donc un mélange de distributions. Il correspond à la somme des distributions des K populations pondérées par la taille de ces populations Π_k qui représente la proportion d'individus appartenant à ces populations. Chaque population est ainsi caractérisée par cette proportion et les paramètres de la distribution de la population k , symbolisés par Θ_k .

Les variables du mélange sont constituées par X_t (variables observées ou incomplètes) et Z_t (variables cachées) qui donnent Y_t (l'ensemble complet), avec t , l'individu. On cherche à classer un individu dans la population dans laquelle il a la plus forte chance de s'y trouver. C'est la

probabilité que l'individu t appartienne à la population k sachant qu'on a observé pour cet individu t la valeur x_t de la variable X . La valeur z_t est forcément liée à x_t .

Pour plus de détails sur les mélanges, on pourra consulter¹³⁶ et pour les explications sur les estimateurs du maximum de vraisemblance^{137, 138}.

Afin de pouvoir classer les individus dans les populations, il faut connaître leurs caractéristiques que sont Π_k et Θ_k . Il est donc nécessaire de les estimer. Pour cela, on emploie le log de la vraisemblance, un estimateur, dont nous venons de parler et qui offre des propriétés numériques, comme la convexité, et statistiques intéressantes (Bonnans, 2003). Les estimateurs sont difficiles à obtenir du fait de la complexité de ce log. Aussi, on utilise des algorithmes itératifs de recherche de maximum et de minimum de fonctions selon la situation. L'algorithme EM est exécuté dans les modèles de mélange. Il est relativement simple et donne de bons résultats quant à l'obtention d'estimateurs explicites. Nous le présentons dans le paragraphe qui suit.

L'algorithme Estimation Maximisation, son application et apprentissage profond

L'algorithme EM est un algorithme itératif conçu par Dempster, Laird et Rubin en 1977. C'est une méthode d'estimation paramétrique de type maximum de vraisemblance. Quand on dispose de données qui ne permettent pas d'estimer les paramètres et/ou que l'expression de la vraisemblance est analytiquement impossible à maximiser, l'algorithme EM peut être la solution.

Cet algorithme comporte deux parties que sont l'estimation (expectation) et la maximisation (maximization).

- L'estimation (E) concerne l'estimation des données inconnues connaissant les données observées et la valeur des paramètres à l'itération précédente.
- La maximisation (M) concerne la maximisation de la vraisemblance utilisant l'estimation des données inconnues de l'étape précédente et mettant à jour la valeur du ou des paramètres pour la prochaine itération.

L'algorithme garantit que la vraisemblance augmente à chaque itération. Ce qui conduit à des estimateurs de plus en plus satisfaisants.

Notre approche consiste donc à maximiser le log-vraisemblance de façon à augmenter nos chances d'identifier des motifs répétitifs. Nous l'avons associée à un apprentissage profond de type convolution.

Nous avons adapté un réseau de neurones à convolution (CNN - Convolutional Neural Network) de manière à cartographier les paramètres physiologiques et les états cachés de l'utilisateur. Tout

¹³⁶ http://www.unilim.fr/pages_perso/pierre.dusart/Probas/cours_stat_S4.pdf - consulté le 6 août 2019

¹³⁷ <https://chesneau.users.lmno.cnrs.fr/EMV-cours.pdf> - consulté le 3 août 2018

¹³⁸ <https://www-ljk.imag.fr/membres/Olivier.Gaudoin/PMS.pdf> - consulté le 6 août 2019

réseau de neurones profond hybride, comme les CNN, contient un noyau. Les CNN sont très utilisés pour l'analyse d'images et ont pour but principal d'extraire des caractéristiques d'une image donnée qui est une matrice de valeurs relatives aux pixels. Ils sont intéressants en ce sens qu'ils font de l'apprentissage sans supervision. L'absence de paramétrage et d'intervention de l'humain sont un sérieux avantage. Dans ce type de réseau, lorsqu'il est appliqué à l'image, celle-ci est découpée en zones (des tuiles) traitées séparément par un neurone. Les neurones ont tous le même paramétrage. La convolution correspond au fait d'avoir un même traitement légèrement décalé pour chaque champ récepteur que représente la zone analysée un peu plus grande que la tuile. Le noyau de convolution est cette couche de neurones ayant les mêmes paramètres. En ce qui nous concerne, cette technique nous permet de trouver les similitudes entre toutes les observations donc les vecteurs obtenus des signaux physiologiques.

Notre première couche de traitement appliquée à nos paramètres physiologiques et états cachés est la fonction « TanHyperbolic », tangente hyperbolique (Tanh) qui constitue la fonction d'activation pour le modèle de classification de valence. Elle passe graduellement de -1 à 1 et peut donc être utilisée pour représenter un phénomène de transition progressive, « douce », entre deux états, nos états. Nous utilisons également la fonction « ReLU », Rectilinear Units, unité de rectification linéaire, comme activation pour le modèle d'intensité (arousal). Ces constructions que sont la valence et l'intensité font partie des travaux en neurosciences et psychologie cognitive (Cheng, 2017). On peut rappeler que la valence donne le caractère positif ou négatif de l'émotion issue du stimulus et que l'arousal est la force du stimulus émotionnel.

La fonction Tanh rend donc un résultat compris entre -1 et 1. Elle est meilleure que la fonction sigmoïde dont le résultat est centré sur zéro (entre 0 et 1) engendrant la saturation de certains neurones. Même si elle est meilleure, elle engendre aussi une certaine saturation qu'il est possible de gérer grâce à l'unité de rectification linéaire.

La fonction ReLU est donnée par la formule $f(x) = \max(0, x)$. Si l'entrée est négative, la sortie est zéro. Dans le cas où l'entrée est positive, la sortie est x . Ceci empêche la saturation et permet d'augmenter la convergence du réseau. Il existe tout de même un problème. En effet, dans le cas d'entrée négative, le neurone reste inactif et donc les poids ne sont pas mis à jour engendrant un non apprentissage du réseau et une propagation d'erreur. Pour éliminer cette inactivité, nous avons eu recours à la technique de « leaky ReLU » qui se traduit par la fonction suivante $f(x) = \max(0.1x, x)$. Elle corrige ainsi la fonction ReLU lorsque l'entrée est négative.

En suivant ce paradigme, l'approximation et la corrélation des signaux physiologiques avec des classes d'émotions possibles peuvent être données comme suit :

- Etant donné les quatre variables physiologiques d'entrée, chaque participant fournit une prédiction pondérée des différentes classes d'« émotions » ou états émotionnels possibles. Cependant, les étiquettes des émotions ne sont pas disponibles (non supervision), ces classes sont non étiquetées mais elles existent.
- Toutes ces prédictions pondérées des participants sont concaténées dans une matrice afin de calculer les vecteurs de poids moyens.
- On obtient ainsi un regroupement d'états émotionnels discret en calculant le poids moyen max.

Les résultats obtenus sont disponibles dans (Gal, Banerjee, Rad 2019). Pour les améliorer, nous avons introduit une technique supplémentaire palliant la non labellisation et la potentielle existence d'une relation entre les signaux physiologiques et des états émotionnels. Il s'agit de la régression à vecteurs support (SVR, Support Vector Regression). La technique de SVR nous permet d'affiner les résultats obtenus précédemment et de passer au mode continu auquel appartiennent les émotions. Nous l'exposons rapidement ci-après.

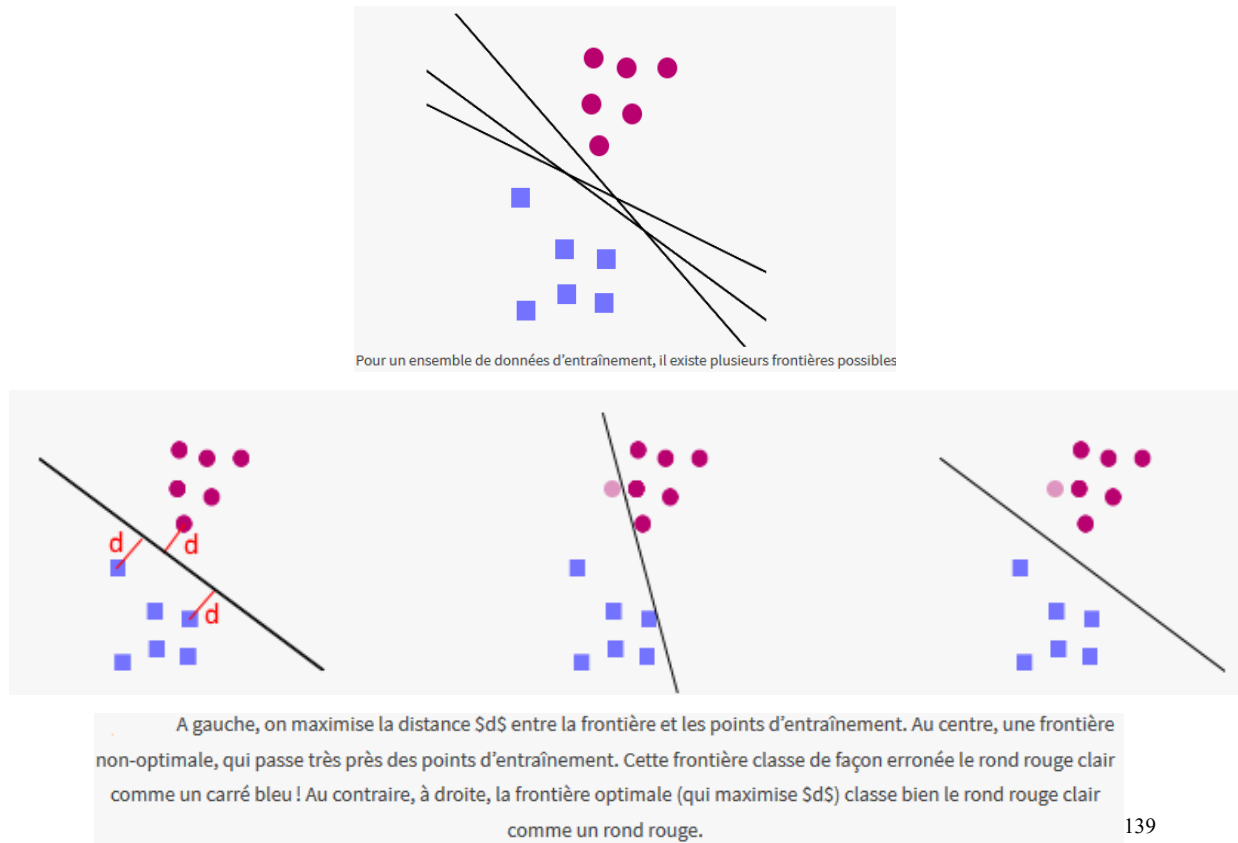
L'algorithme SVR et son application

Comme nous l'indiquons ci-dessus, nous ne disposons pas de labels pour les classes d'états émotionnels et nous supposons qu'il pourrait exister un lien entre les mesures physiologiques et les émotions. L'analyse et plus particulièrement la convergence de l'analyse à partir de nos données relève d'une méthode de type SVR. SVR est un algorithme de régression dont on se sert en présence de valeurs continues et qui fonctionne sur le principe des noyaux. SVR est une formulation des machines à vecteurs support (SVM) connues pour la reconnaissance de formes et la classification.

Une SVM n'est pas un modèle probabiliste. Elle permet d'apprendre un séparateur i.e. qui définit l'appartenance des données ou vecteurs à un groupe ou à un autre donc le bon placement des frontières. Trouver le séparateur revient à construire une fonction prenant un vecteur des données afin de le placer au mieux, avec le plus de vraisemblance dans le groupe auquel il appartient. Autrement dit, elle essaie de tracer une ligne simple, ou un plan ou un hyperplan pour séparer au mieux les points i.e. nos observations. Cette technique peut être étendue par régression. Cela consiste non plus en la classification mais en l'apprentissage d'un modèle pouvant prédire les valeurs d'une fonction à partir des variables d'entrée.

Afin de mieux cerner SVM, voici un schéma qui explique son fonctionnement par l'image.

Lors d'un apprentissage sur un ensemble de données, plusieurs frontières sont possibles. Il en existe une infinité. Il faut choisir.



139

Figure 119 : Fonctionnement d'une machine à vecteurs support (SVM)

Le dernier graphique de l'image de la figure 119 montre que la frontière la plus éloignée des différents points est la meilleure. C'est SVM qui permet de trouver cette frontière en maximisant la distance entre les points d'entraînement et la frontière. Il est très fréquent de ne pas trouver une séparation linéaire et, dans ce cas, qui est aussi le nôtre, on utilise une astuce de noyau (kernel trick) qui opère une transformation pour pouvoir classer les objets. Ce noyau permet d'apprendre une SVM non linéaire.

L'algorithme SVR a été appliqué sur les éléments de sortie de EMDeep, donc après avoir trouvé des regroupements d'états. Le plus difficile à élaborer est le noyau. Son choix détermine le comportement de la classification finale. Les résultats nous montrent l'apparition de zones

¹³⁹ <https://zestedesavoir.com/tutoriels/1760/un-peu-de-machine-learning-avec-les-svm/#9-a-vous-de-jouer-> - consulter le 9 août 2019

distinctes et une zone plutôt constituée d'un mélange d'observations ne trouvant pas vraiment de place dans les parties bien limitées.

Notre modèle hybride EMDeep et résultats (Gal, Banerjee, 2019)

La synthèse de notre modèle s'illustre par le schéma suivant :

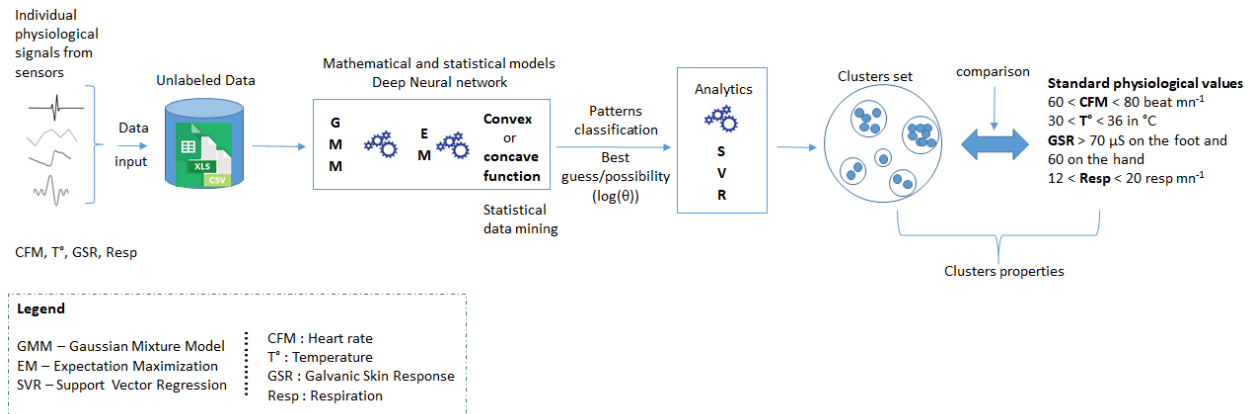


Figure 120 : Technique d'apprentissage automatique pour la classification d'états émotionnels à partir de mesures physiologiques

Le processus démarre par l'acquisition et l'enregistrement des données soumises à différentes techniques mathématiques et statistiques de fouille de données associées et adaptées au contexte des données physiologiques. Les potentiels états et motifs obtenus sont ensuite soumis à un algorithme de régression. Les résultats de la méthode procurent un ensemble de clusters.

Dans l'apprentissage automatique proposé, les techniques EM et SVR offrent des fonctions mathématiques adaptées à la recherche d'une reconnaissance et classification d'états émotionnels sans étiquette. Dans l'exploitation des trois fichiers contenant les données manipulées par le modèle, nous avons obtenu des groupes relatifs à deux états plus un groupe de mélanges. Le troisième groupe est constitué de données sans rassemblement fort en terme de similarités ou dissimilarités. On ne les comprend pas exactement. Il est nécessaire d'appliquer de nouvelles techniques pour améliorer la compréhension de ces données.

Ces classes ne sont toujours pas étiquetées et ont été comparées aux valeurs standards physiologiques. Nous constatons que ce modèle hybride semble nous apporter des conclusions relativement similaires à la méthode que nous avons mise en œuvre avec les cartes de Kohonen. Il apparaît trois zones par rapport aux trois fichiers manipulés orientant vers des types d'individus. Une approche via les techniques floues est en cours. Il s'avère qu'en matière d'émotions ou d'états

émotionnels rien n'est jamais complètement bien circonscrit, borné. La logique floue apporte une classification plus réaliste, plus proche des caractéristiques et du raisonnement de l'humain. La description d'une situation se fait à l'aide de variables linguistiques qui déterminent une appartenance. Celle-ci se traduit par une équivalence d'appartenance à un ensemble. Une observation, par exemple, ne sera pas dans l'ensemble 1 ou l'ensemble 2 mais pourra appartenir à l'ensemble 1 avec un facteur de 0,7 et à l'ensemble 2 avec un facteur de 0,3. Ceci apporte une nuance intéressante, une subdivision plus fine offrant plus de précision ou une résolution plus subtile.

4.5.6. Conclusion

Notre point de départ pour résoudre notre problématique, à savoir découvrir des états émotionnels, a été la collecte des données relatives à des mesures physiologiques choisies afin de mettre au jour ces états et éviter certains biais. Pour cela, nous avons appliqué des méthodes tant pour la collecte que pour l'analyse. La technique de récupération de données s'est déroulée selon un plan d'expériences et un sondage par le moyen de questionnaires. Nous avons recueilli des données qualitatives et quantitatives. La thèse ne traite que des données quantitatives. Les autres données feront l'objet d'un futur travail.

Notre choix d'exploration non supervisée a conduit à l'utilisation de certaines techniques appliquées dans ces conditions, à savoir le clustering. Avant cette phase d'auto-organisation des données, il est important de signaler que le cheminement dans leur analyse a été long et fastidieux pour de nombreuses raisons, surtout quant à la préparation des données. Il est impensable de s'engager dans l'application directe de techniques ou d'algorithmes pointus sur des données non nettoyées, non prétraitées. Les statistiques descriptives ont également été utilisées pour une première analyse et l'adoption d'orientations. Toute cette phase occupe la majeure partie du temps de traitement. Sans ce travail préliminaire, il n'est pas possible de réaliser une bonne analyse.

A la suite de cela, nous avons mis en place, pas à pas, deux méthodes :

- L'une, à base des cartes de Kohonen, se traduit par environ 2 500 lignes de code en R,
- L'autre, portant sur un nouveau modèle hybride, EMDeep, adapté à nos données, se traduit par environ 1 200 lignes de code en Python,

montrant chacune comment aborder les données, suivre leur comportement, approfondir leur compréhension et aboutir à des résultats, même s'ils ne sont pas exactement tels qu'on aurait pu les envisager. Ces méthodes apportent des réponses à nos questionnements.

Trouver des états émotionnels à partir de variables physiologiques est complexe surtout à l'aveugle. En effet, nous n'orientons pas du tout les données vers des ensembles établis d'émotions. Nous essayons de construire une cartographie à partir des informations brutes des biocapteurs.

Grâce aux méthodes employées, créées, nous avons d'une part, mis en évidence des classes pouvant représenter des types d'individus. Les sauts de certains neurones marquent des événements particuliers liés à des stimuli engendrant des changements d'états. D'autre part, nous avons avec EMDeep fait émerger des groupes relatifs à des états émotionnels que nous ne savons pas encore nommer.

Les deux voies suivies offrent la reconnaissance d'états et nous incitent à poursuivre. Il est important d'affiner nos résultats afin de déterminer la possibilité d'identifier ces états. Une investigation plus fine à l'aide de la mise en place d'algorithmes encore plus ajustés à nos données spécifiques ou plus exactement aux résultats déjà acquis s'impose à partir de ces nouvelles connaissances.

Nous avons déjà envisagé de nous diriger vers les chaînes de Markov cachées, à partir de nos cartes de Kohonen, offrant la possibilité de découvrir des états inconnus. Nous avons également entrepris des démarches portées par la logique floue (fuzzy logic) qui se rapproche du raisonnement humain, plus intuitif, et permettant d'appréhender des phénomènes naturels, imprécis comme le sont les états émotionnels. Là encore, nous continuons nos explorations à partir de nos résultats.

4.6. Bibliographie

- Abdat, F. (2010). *Reconnaissance automatique des émotions par données multimodales : expressions faciales et des signaux physiologiques*. (Thèse de doctorat, Université Paul Verlaine, Metz).
- Bonnans, J. (2003). *Optimisation continue, cours et problèmes corrigés*. Dunod.
- Breedlove, M., S., Rosenzweig, M. R., Watson, N. V. (2012). *Psychobiologie. De la biologie du neurone aux neurosciences comportementales, cognitives et cliniques*. Paris, De Boeck.
- Cheng, Z., Shu, L., Xie, J., Chen, C.P. (2017) *A novel ECG-based real-time detection method of negative emotions in wearable applications*. In *Proceedings of the International Conference on Security, Pattern Analysis, and Cybernetics*, Shenzhen, China, 15–17 December 2017; pp. 296–301. 39.
- Gal, V., Gressier-Soudan, E. (2016). *Recherche d'une classification d'états émotionnels à des fins de nouvelles interactions Humain Environnement*. Actes de la 28ième conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine, Oct 2016, Fribourg, Suisse. pp.307-313, 10.1145/3004107.3004143 hal-01384351
- Gal, V., Banerjee, S., Rad, V. D. (2019). *Investigation of Emotion Instances and Class Analysis from Physiological Sensors by Unsupervised Hybrid EMDeep Model*. The Sixth Euro-China Conference on Intelligent Data Analysis and Application (ECC 2019) Arad Romania, October 15-18, 2019
- Gal, V., Banerjee, S., Rad, V. D. (2019). *Investigation of Emotion Instances and Class Analysis from Physiological Sensors by Unsupervised Hybrid EMDeep Model*. Special Issue of the Journal of Intelligent and Fuzzy Systems (accepté)
- Goldberger, J., Gordon, S., Greenspan, H. (2003) *An efficient image similarity measure based on approximations of KL-divergence between two Gaussian mixtures* - ieeexplore.ieee.org - Conference: Computer Vision, 2003. Proceedings. Ninth IEEE International Conference on Computer Vision - DOI: 10.1109/ICCV.2003.1238387
- Goupy, J (2013). *Introduction aux plans d'expériences. Avec applications*. Paris, Dunod.
- Hajjar, C. (2014). *Cartes auto-organisatrices pour la classification de données symboliques mixtes, de données de type intervalle et de données discrétisées*. (Thèse de doctorat, Supélec, Gif-sur-Yvettes).
- Hamdi, H. (2012). *Plate-forme multimodale pour la reconnaissance d'émotions via l'analyse de signaux physiologiques : Application à la simulation d'entretiens d'embauche*. (Thèse de doctorat, Université d'Angers).
- Kohonen, T. (1990). The self-organizing map. *Proceedings of the IEEE*. 78(9), 1464 – 1480. doi: 10.1109/5.58325
- Kohonen, T. (2012). Essentials of the self-organizing map. *Neural Networks: the official journal of the International Neural Network Society*. 37, 52-65. doi: 10.1016/j.neunet.2012.09.018

- Marzuki, A., Dioren-Rumpa, L., Wibawa, A. D., Purnomo, M. H. (2016). Classification of human state emotion from physiological signal pattern using pulse sensor based on learning vector quantization. *2016 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), Lombok*, 129-134. doi: 10.1109/ISITIA.2016.7828646
- Mermillot, M. (2016). *Réseaux de neurones biologiques et artificiels. Vers l'émergence de systèmes artificiels conscients ?* Paris, De Boeck.
- Morange-Majoux, F. (2011). *Manuel visuel de Psychophysiologie*. Paris, Dunod.
- Pannucci, C. J., Wilking E. G. (2010). Identifying and Avoiding Bias in Research. *Plastic and reconstructive surgery*. 126(2), 619-625. doi:10.1097/PRS.0b013e3181de24bc.
- Reynolds, D.A., Quatieri, T.F., Dunn, R.B. (2000). *Speaker verification using adapted gaussian mixture models*. *Digital Signal Processing*, 10(1-3):19–41.
- Saporta, G. (2011). *Probabilités, analyse de données et statistiques*. Paris, Technip.
- Shu-Hsien, L., Pei-Hui, C., Pei-Yuan, H. (2012). Data mining techniques and applications – A decade review from 2000 to 2011. *Journal of expert system with applications*, 39, 11303-11311. doi : 10.1016/j.eswa.2012.02.063
- Vallerand, R. J. (2006). *Les fondements de la psychologie sociale*. Montréal, Gaëtan Morin.
- Willshaw, D. J., Von der Malsburg, C. (1976). How patterned neural connections can be set up by self-organization. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 194(1177), 431–445. doi: 10.1098/rspb.1976.0087
- Zhai, J., Barreto, A. (2006). Stress detection in computer users based on digital signal processing of noninvasive physiological variables. In *Engineering in Medicine and Biology Society, 2006. EMBS'06. 28th Annual International Conference of the IEEE*. 1355-1358. doi: 10.1109/IEMBS.2006.259421
- Zhang, D., Lu, G. (2003). A comparative study of curvature scale space and Fourier descriptors for shape-based image retrieval. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 14(1), 39-57. doi: 10.1016/S1047-3203(03)00003-8

4.7. Sitographie

Albouy-Llaty, M. (2011). Les biais. http://medphar.univ-poitiers.fr/santepub/images/staff_2011/0525_BIAIS.pdf, consulté le 3 novembre 2017.

Bennani Y. (2014). Apprentissage par réseaux de neurones artificiels. https://epat2014.sciencesconf.org/conference/epat2014/pages/EPAT_2014_ANN.pdf, consulté le 4 février 2018

Boucher, J.-M. (2014). Les dix biais cognitifs qui nous trompent le plus souvent. <https://www.consoglobe.com/10-biais-cognitifs-qui-trompent-le-plus-souvent-cg>, consulté le 3 novembre 2017.

Cardon, D. (2012). Regarder les données. <http://www.cairn.info/revue-multitudes-2012-2-page-138.html>, consulté le 14 novembre 2017.

Carte auto adaptative (s. d.). Dans *Wikipédia, l'encyclopédie libre*. Consulté le 12 octobre 2015 à https://fr.wikipedia.org/wiki/Carte_auto_adaptative

Giezendanner, F. D. (2012). Enquêtes : Principaux biais dans la formulation des questions. <http://icp.ge.ch/sem/cms-spip/spip.php?article1765>, consulté le 2 décembre 2017

Michotte, L. J. (2007). La formule de Karvonen. <http://www.provincedeliege.be/sites/default/files/media/82/La%20formule%20de%20Karvonen.pdf>, consulté le 25 mars 2018.

Mucci, P. (s. d.). Epreuves d'exercice musculaire et aptitude aérobie. http://campusport.univ-lille2.fr/mucci/Cours_2.pdf, consulté le 25 mars 2018

Neurobranchés (s. d.). La cellule nerveuse en activité : le potentiel d'action. <http://neurobranches.chez-alice.fr/neurophy/potact.html>, consulté le 21 janvier 2017

Chapitre 5

En partance pour le jeu

« Le jeu est la forme la plus élevée de la recherche ». Albert Einstein

5. JEU ET PLATE-FORME.....	281
5.1. INTRODUCTION.....	281
5.2. DEFINITIONS ET REFERENCES : JEU, PERVASIF ET UBIQUITAIRE, JEU PERVASIF, JEU UBIQUITAIRE, JEU VIDEO	282
5.3. UNIVERS TECHNIQUE	289
5.4. CONCEPTION D'UN JEU ET MODELES	290
5.4.1. Conception.....	291
5.4.2. Modèles.....	293
5.5. PLATE-FORME DE JEU PERVASIF PRESENTIE.....	297
5.6. CONCLUSION.....	298
5.7. BIBLIOGRAPHIE.....	300
5.8. SITOGRAPHIE.....	302

5. Jeu et plate-forme

5.1. Introduction

Notre sujet porte sur la réflexion d'une nouvelle forme d'interaction dans les jeux vidéo et pervasifs. Nous nous sommes déjà expliqués sur le choix de cet environnement. Pour rappel, l'univers dans lequel nous voulons tester nos expérimentations qu'elles soient de type réseau, interactionnelles, émotionnelles est celui du jeu. C'est un espace ouvert où les protocoles ne sont pas contraints comme dans le milieu médical, pour tout nouvel essai ou test. Il est encore un peu trop large pour l'instant, du moins dans le cadre de la thèse. Nous avons donc opté, dans un premier temps, pour un jeu pervasif, dans un univers clos comme dans les jeux d'évasion (escape games ou escape rooms)¹⁴⁰. Il est plus facile de contrôler l'environnement, les objets communicants... Notre système global est ubiquitaire ou plutôt pervasif, proposant des services adaptés non à la difficulté du jeu mais à l'état émotionnel du joueur, son ressenti. Ce système dispose d'un ensemble d'informations décrivant les éléments informatiques (réseau, dispositifs de captation, applications, modèles...), les éléments du jeu (dispositifs d'interactions, l'histoire, les règles...), le joueur. Chaque joueur est unique même si certaines expressions, émotions peuvent se retrouver d'un individu à un autre.

Nous commençons donc par un jeu pervasif avec l'intention d'aborder le jeu vidéo dans un autre travail. Le jeu constitue l'articulation entre le joueur et l'environnement et est une des étapes de tests de nos modèles en réel. Un point important aussi à mettre en avant est que, contrairement au jeu classique, le jeu pervasif fondé sur les états émotionnels ne peut pas être transmis à d'autres joueurs en terme d'expérience. Ce qui permet de conserver l'intérêt, l'aventure, la réflexion. En effet, comme le jeu s'appuie sur les émotions de chacun, il prend une autre dimension et s'adapte au joueur changeant ainsi le jeu lui-même.

Pour y accéder, un nouveau champ s'ouvre à nous. Il va falloir acquérir un langage vidéo ludique. Tous les moyens sont à étudier et à utiliser en fonction de l'environnement. Le but premier est de fournir du plaisir, de la distraction, de l'amusement, de l'évasion, du bonheur voire du bien-être au travers d'une expérience interactive ludique bien construite, tout comme on peut trouver ces

¹⁴⁰ « Le **jeu d'évasion**, également désigné par les termes anglais *escape game* ou *escape room* est un type de jeu grandeur nature constituant la déclinaison physique des jeux vidéo de type « *Escape the room* » ». https://fr.wikipedia.org/wiki/Jeu_d%27%C3%A9vasion_grandeur_nature – consulté le 25 août 2019

aspirations avec un livre, la musique, une balade... associée à un petit plus relatif à la prise en compte de l'état émotionnel du participant. Le défi est d'atteindre ce but au travers de l'identification des états émotionnels afin d'être au plus proche du joueur en lui proposant un jeu adapté. On entend par jeu adapté un jeu allant soit dans le sens de l'utilisateur, soit en le mettant dans des situations délicates, de gageures... lui laissant un goût de « revenez-y ».

Ce chapitre a pour objectif de proposer une méthodologie, des recommandations dans la construction d'un jeu pouvant mêler des états émotionnels et de préciser comment se structure notre environnement expérimental pour aller vers une proposition nouvelle, interactive et émotionnelle. Des définitions et références alimentent la première partie. L'univers technique sera ensuite abordé succinctement suivi de la façon dont nous envisageons la construction du jeu tant du point de vue des mécaniques que du contenu nous sortant peut-être du cercle magique de Huizinga. Avant de terminer par une conclusion nous projetant vers quelques réflexions ludiques, nous exposons les grandes lignes de notre plate-forme de jeu pervasif.

5.2. Définitions et références : jeu, pervasif et ubiquitaire, jeu pervasif, jeu ubiquitaire, jeu vidéo

Nous présentons quelques définitions relatives aux jeux et plus particulièrement ceux vers lesquels nous nous sommes tournés. Les définitions sont multiples et ne convergent pas toujours ou restent ambiguës. Nous mentionnons également quelques fondements en la matière.

Tout d'abord qu'est-ce qu'un jeu ?

« Le mot « jeu » vient du mot latin *jocus* signifiant « plaisanterie » ou « badinage », qui a aussi donné en français jouet. Par métonymie, on appelle « jeu » l'ensemble des cartes à jouer, et par extension, tout assortiment ou ensemble. En informatique, on a ainsi des jeux de données. Le « jeu » peut aussi désigner la façon personnelle de pratiquer un jeu ou de jouer d'un instrument. En latin les jeux sont désignés par *ludi*, qui a donné en français « ludique *et autres dérivés* (*ludothèque, ludant, ludé, ludion...*) »¹⁴¹.

Le jeu est aussi défini par Huizinga (1951) comme « *une action libre, sentie comme fictive et située en dehors de la vie courante, capable néanmoins d'absorber totalement le joueur ; une action dénuée de tout intérêt matériel et de toute utilité ; qui s'accomplit en un temps et dans un espace expressément circonscrits, se déroule selon des règles données et suscite dans la vie des relations*

¹⁴¹ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Jeu> - consulté le 11 mai 2019

de groupes s'entourant volontiers de mystère ou accentuant par le déguisement leur étrangeté vis-à-vis du mon habituel ». Caillois (1967) reprend cette définition, l'analyse et la complète. Le jeu est pour lui une activité pourvue de six caractéristiques formelles :

- Libre : pas d'obligation de jouer
- Séparée : des limites d'espace et de temps
- Incertaine : non déterminée et sans résultat acquis avec une certaine liberté laissée au joueur
- Improductive : sans apport en dehors du cercle de jeu
- Régulée : soumise à des conventions
- Fictive : appartenant à l'irréel.

Le quatrième point reste à discuter car tout dépend des jeux. Par exemple, si on choisit des jeux communautaires, des jeux où évoluent des guildes, les apports se traduisent dans la vie par des relations étendues avec les autres joueurs (partage, amitié...).

Nous employons les mots ubiquitaire et pervasif pour désigner notre univers. Pour définir ces termes, Diane Dufort (2016) fait un état intéressant de ces mots et de leur utilisation. Nous retiendrons également de ces propos qu'il existe une différence entre les deux concepts même s'ils sont souvent considérés comme identiques. L'un, ubiquitaire, fait appel à l'architecture d'un point de vue technique ainsi que les dispositifs informatiques associés au sens de Mark Weiser. Les frontières environnementales seraient fixes. L'autre, pervasif, traduit une transition entre deux états, de devenir et de transformation (Saha, Mukerjee, 2003) et véhicule une approche culturelle centrée sur l'utilisateur (Brown, 2007 ; Nieuwdorp, 2007). Les frontières de l'environnement évoluent (Mc Gonigal, 2006).

L'ubiquité ou l'omniprésence est la possibilité d'être présent dans plusieurs endroits en même temps. Ce terme provient du latin « ubique » signifiant partout. En informatique, cela désigne les environnements dans lesquels des dispositifs dits « intelligents » sont enfouis, intégrés et interconnectés. L'environnement ubiquitaire numérique dicte une proactivité i.e. que des processus peuvent envoyer des informations à des dispositifs ou en recevoir sans action de l'utilisateur. Nous en avons déjà discuté dans le chapitre sur les interactions.

Le terme pervasif ne figure pas officiellement dans la langue française. C'est l'utilisation du mot anglais pervasive que l'on traduit par omniprésence qui fait ambiguïté avec l'ubiquité. La pervasivité intègre des technologies informatiques et de communications et comporte trois dimensions (Kourouthanassis, 2007) : la diffusion de l'information issue de technologies différentes qu'elles soient infrastructurelles ou interfacielles, l'utilisation de l'ubiquité dans le sens de l'accessibilité des informations et des interactions quels que soient le lieu et le moment, la prise en compte des exigences des utilisateurs et du contexte comme l'activité en cours, le temps de

traitement des informations, les modalités d'interaction... Dans un environnement pervasif, les objets peuvent interagir entre eux sans intervention de l'utilisateur.

Le concept de pervasivité est, à notre sens et au vu des différentes définitions, plus large que l'ubiquité et l'inclut, tout comme il comprend la réalité alternée.

La réalité alternée, aussi appelée réalité intégrée (alternate reality), permet de lier monde réel et monde virtuel. Elle est, la plupart du temps, associée à l'univers du jeu que nous abordons dans la suite.

Ceci étant écrit, comment peut-on articuler ces concepts aux jeux ?

« Le jeu pervasif est un type de jeu qui intègre des interfaces émergentes afin de créer une expérience de jeu qui combine des éléments des mondes réels et virtuels. Ce concept vient du terme anglais Pervasive Games et est proche de celui du jeu en réalité alternée ». Wikipédia¹⁴². Rien n'est vraiment bien défini. Eva Nieuwdorp (2007) a essayé de donner des précisions quant aux jeux pervasifs en se fondant sur les définitions les plus communes et a retenu sept critères :

- Un jeu qui repose principalement sur une technologie omniprésente et des dispositifs d'entrée non standards
- Un jeu augmenté de matériel informatique mêlant monde réel et monde virtuel, qui imprègne le monde réel d'une manière diffuse et se fond avec lui
- Un jeu qui brouille les frontières entre les deux mondes
- Un jeu qui est une superposition du monde réel
- Un jeu persistant, disponible à tout moment
- Un jeu qui interagit avec le monde réel cassant les conventions des jeux standards, où les joueurs interagissent entre eux et avec les éléments du monde réel
- Un jeu qui se mêle aux expériences quotidiennes.

Le jeu en réalité alterné ou JRA (Alternate Reality Game – ARG) est une histoire interactive se déroulant dans le monde réel, utilisant une narration transmédia¹⁴³ et évoluant en fonction des actions du joueur. Il exploite deux espaces, l'univers ludique relatif à l'imaginaire du jeu et le monde réel relatif à la place où se joue le jeu. Les JRA sont vus comme des jeux pervasifs (Eyles et Eglin, 2007). Gorla (2017) fait état des marges du JRA. Le jeu ubiquitaire allie le jeu à des dispositifs intelligents, invisibles.

¹⁴² https://fr.wikipedia.org/wiki/Jeu_pervasif - consulté le

¹⁴³ « La **transmédialité** est un terme issu du concept anglais **narration transmédia** « **transmédia storytelling** ». La narration transmédia, tel que conçu par Henry Jenkins en 2003 est processus de déploiement d'œuvres de fiction caractérisé par l'utilisation combinée de plusieurs médias pour développer une expérience unifiée et cohérente » - <https://fr.wikipedia.org/wiki/Transm%C3%A9dialit%C3%A9> - consulté le 25 août 2019

Le jeu vidéo peut être défini comme une application interactive, simulant des expériences sur écran, impliquant les utilisateurs. Le concept de jeu vidéo désigne tout jeu numérique interactif quel que soit son support physique. Il existe différentes définitions. Le dico du net propose : « *Un jeu vidéo est une activité de loisir basée sur des périphériques informatiques (écran LCD, manette/joystick, hauts parleurs...) permettant d'interagir dans un environnement virtuel conformément à un ensemble de règles prédéfinies* »¹⁴⁴. Quant à l'Office Québécois de la Langue Française, il énonce : « *Œuvre audiovisuelle interactive et ludique dont le contenu est programmé et diffusé sur un support de stockage qui en permet l'affichage sur un écran, où le joueur contrôle l'action qui s'y déroule, à l'aide d'un périphérique de jeu, dans un but de divertissement ou de compétition* ».¹⁴⁵

Le jeu est construit sur des principes que B. Paras (2005) évoque. Ces principes, à considérer au niveau de la création d'un jeu vidéo, sont :

- Le défi, le désir d'atteindre les objectifs et un bon feedback pour améliorer les compétences
- Trouver dans le jeu une curiosité sensorielle et cognitive
- Avoir un sentiment de contrôle grâce aux feedbacks
- User de fantasmes et d'imaginaire pour renforcer les objectifs et stimuler les intérêts.

Tout ceci se rapproche fortement des principes du flow présentés en 5.4.2.

Quant au jeu pervasif, il intègre finalement toutes les combinaisons, même celle du jeu vidéo. Nous choisissons donc cette appellation.

Markus Montola (2005) exprime ce qui différencie le jeu vidéo du jeu pervasif au travers de trois caractéristiques autres que technologiques, à savoir :

- L'espace
- Le temps
- Le social.

Les différences entre un jeu vidéo classique et un jeu pervasif sont également l'univers, l'espace dans lequel se déroule le jeu, l'immersion, l'implication du joueur dans l'histoire. Le joueur, en tant que personne physique, fait partie du jeu pervasif. Dans le jeu vidéo, il est une représentation souvent par le biais d'un avatar.

Tous ces jeux reposent sur la notion du jeu et de l'amusement. Une partie de l'immersion est apportée par la technologie et par l'histoire auxquelles le joueur adhère. C'est l'expérience vécue fournie par ces jeux qui transporte le joueur lui faisant ressentir des sensations, des émotions se

¹⁴⁴ <http://www.dicodunet.com/definitions/sports-loisirs/jeu-video.htm> - consulté le 24 août 2019

¹⁴⁵ http://www.granddictionnaire.com/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8355614 – consulté le 24 août 2019

traduisant par des phénomènes physiques. L'expérience vécue est variable selon chacun et peut-être minimale comme immense quand notre vision du monde ou de nous-même est changée, transformée.

Parmi les jeux pervasifs on peut bien sûr citer le jeu élaboré dans le cadre du projet PLUG que nous avons mentionné à plusieurs reprises.

Un des premiers jeux du genre dont nous avons entendu parler est le **projet momentum** réalisé dans le cadre d'un projet européen IPerG (Integrated Project on Pervasive Gaming). Ce jeu est un jeu pervasif et s'apparente aux jeux de rôle en grandeur nature. Il se déroule sur cinq semaines, 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7 et a pris place en Suède en 2006. Le monde réel et le monde du jeu sont mêlés. Une description est donnée dans (Stenros, 2007). Les accessoires utilisés dans le jeu sont parfois reconnaissables mais pas toujours (voir les images suivantes).



Figure 121 : Exemple 1 d'accessoires utilisés dans le projet Momentum

Les joueurs peuvent être amenés à utiliser un gant intégrant un capteur RFID pour entrer en contact avec les endroits magiques d'un lieu ou à manifester en pleine rue dans la ville lors d'événements liés au jeu, figure 122.



Figure 122 : Exemple 2 d'accessoires utilisés dans le projet Momentum et lieu d'événement

Ingress, 2012, créé par John Hanke, est un jeu multi-joueurs développé par Google relayé par Niantic, s'exécutant sous Android et iOS, dans lequel les joueurs se déplacent dans le monde réel pour interagir avec le monde du jeu, fondé sur la réalité augmentée.



Hack alien portals in your own neighborhood.
Screengrab: Rob LeFebvre/Cult of Mac

146

Figure 123 : Exemple d'écran du jeu Ingress

¹⁴⁶ <https://www.cultofmac.com/324326/meet-ingress-your-new-augmented-reality-obsession/> - consulté le 7 septembre 2019

Afin de remplir certaines missions, il est nécessaire que les joueurs s'associent. Les joueurs s'approchent des objets du monde réel désignés, leur position est reportée sur la carte du jeu grâce à la puce GPS du smartphone. Au début du jeu, le joueur choisit sa faction, son camp. Le but est de garder ou protéger des champs d'énergie, collecter des objets et déployer des technologies afin de s'emparer de territoires.

Pokemon Go, 2016, créé par Dennis Hwang, est un jeu multi-joueurs développé par Niantic, s'exécutant sur des plates-formes Android et iOS. Le jeu utilise la technologie de suivi de localisation et de cartographie pour créer une réalité augmentée dans laquelle les joueurs attrapent et entraînent des personnages Pokémon dans le monde réel et se voient attribuer des points qui définissent leur puissance.



(Image credit: Getty Images / Portland Press Herald)

147

Figure 124 : Exemple d'écran du jeu Pokemon Go

L'image ci-dessous présente une illustration des deux jeux, Pokemon Go à gauche, Ingress à droite et est issue de Perez-Colado (2018).

¹⁴⁷ <https://www.gamesradar.com/au/niantic-is-trying-to-stop-pokemon-go-players-from-trespassing/> - consulté le 7 septembre 2019



Pervasive games *PokémonGO* (left) and *Ingress* (right). Both games share avatar (red call-outs) and located game-elements (yellow call-outs). Those elements are only interactive when the player is inside of their influence area. In addition, device orientation (blue call-outs) is always present in the game.

Figure 125 : Exemple comparatif d'écrans de jeux Pokémon Go et Ingress

Toute création ludique implique l'utilisation de techniques, d'outils et de langages de conception. Ces points sont abordés dans les paragraphes qui suivent.

5.3. Univers technique

Les jeux pervasifs reposent sur des techniques informatiques offrant la gestion de :

- La collecte des données
 - La collecte des événements (les actions du joueur)
 - L'envoi des feedbacks
 - Le stockage des données, du jeu
 - L'état d'avancement
 - Le brouillage éventuel des frontières (si plusieurs joueurs et/ou environnement étendu).
- Ce qui n'est pas notre objectif premier.

C'est parfaitement en adéquation avec notre quête. Ils utilisent, pour la grande majorité, une architecture client-serveur (Ballagas, 2007, Björk, 2001, Yang, 2009). Le serveur centralise toutes les données du jeu et du joueur ainsi que tout ce qui a trait au bon déroulement du jeu comme la gestion des événements, le traitement des données, l'avancement dans le scénario...

Le client concerne l'environnement matériel et logiciel assurant les interactions directes avec le joueur. Nous adhérons à cette configuration.

De nombreux travaux sont aussi menés, quant aux systèmes pervasifs, afin d'apporter des solutions à la gestion du système d'information du point de vue matériel, système, réseau ou système d'information à proprement parlé (S.I.). F. Laforest¹⁴⁸ propose des pistes tout comme Khalfi (2014, 2015) présente les défis de l'informatique ambiante dans un environnement pervasif. Le modèle d'architecture proposé pourrait être adapté à notre contexte.

Nous avons abordé la question de notre environnement futur dans le chapitre sur les réseaux. Il sera important, le moment venu, de préciser le fonctionnement exact de l'ensemble.

La structure de ce chapitre porte essentiellement sur une méthode à envisager et des pistes quant à la construction d'un jeu. Nous exposons dans les paragraphes suivants les éléments basiques à son élaboration, les modèles pouvant servir de supports et notre orientation.

5.4. Conception d'un jeu et modèles

Pour être intéressant, le jeu doit offrir au joueur des mécaniques de jeu à fins d'usages et de comportements ludiques. Marc Albinet (2015) nous présente le jeu ou, plus exactement, l'expérience de jeu sous la forme des schémas suivants.

Le premier schéma montre que cette expérience est le concours de la forme en termes de représentation et de mécaniques de jeu et, du fond. Le deuxième schéma, plus complet, détaille chacun des éléments.

$$\begin{array}{c} \text{Expérience de jeu} = \text{Représentation} + \text{Mécanismes ludiques} + \text{Dramaturgie} \\ \begin{array}{cc} \text{-----} & \text{-----} \\ \text{La forme} & \text{Le fond} \end{array} \end{array}$$

Figure 126 : Expérience de jeu = la forme + le fond

¹⁴⁸ <https://slideplayer.fr/slide/1173643/> _ consulté le 25 août 2019

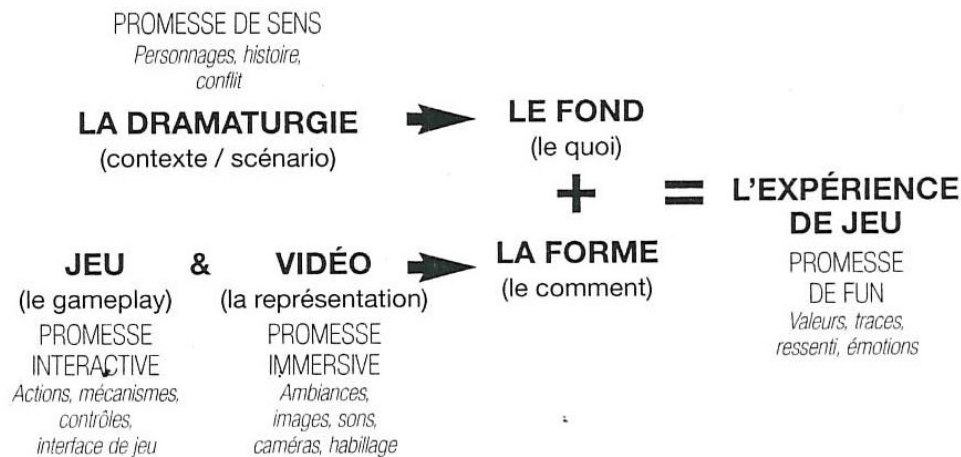


Figure 127 : Expérience de jeu détaillée

5.4.1. Conception

Faire un jeu va donc consister à réaliser un système plus ou moins complexe avec des principes à définir. La conception d'un jeu passe par plusieurs étapes :

- L'identification des intentions : le message à communiquer, ce que l'on veut transmettre. C'est le quoi et le comment du schéma ci-dessus.
- Le gameplay : la jouabilité, primordiale dans un jeu. C'est aussi le ressenti du joueur lorsqu'il joue. On trouve le macro-gameplay et le micro-gameplay. Nous les expliquons ci-après.
- La représentation : la forme artistique, l'ambiance, l'univers, l'habillage audio-visuel...
- Le level design : la continuité du game design, concerne la conception et la fabrication d'une maquette des niveaux de jeu. Il comporte deux parties : le micro-design et le macro-design.
- La conception : la manière de dynamiser le déroulement de création initiale, du message, du contexte et du noyau du jeu. Ceci émerge grâce à des références (littéraires, cinématographiques, artistiques, toutes sources inspirantes), des échanges d'idées, la curiosité au quotidien.
- La pré-production et la production : la pré-production utilise la phase de conception. Elle identifie les détails du jeu. Elle est la période d'établissement du cahier des charges. C'est une synthèse de la préparation à la production. La production concerne la démonstration et la sécurisation du cœur de l'expérience. Elle valide le prototype. Les autres éléments du jeu, afin de le finaliser, ne constituent que des variations de situation. C'est à ce moment que le level design prend le relais.

- a) Le macro-gameplay permet de garantir que chaque moment est intéressant et incite le joueur à continuer le jeu ou à y revenir rapidement. Pour cela, il existe six principes de création et

de contrôle du macro-gameplay. On trouve : la boucle de jeu, la motivation, le système de jeu, la logique du jeu (systémique ou narrative), la structure du jeu et l'accessibilité (utilisabilité, apprentissage et gestion de la difficulté). Le côté systémique de la logique de jeu se fonde principalement sur l'entrecroisement des règles et des mécaniques. Le côté narratif repose sur une histoire, un scénario. Ces deux logiques peuvent être combinées.

La boucle de jeu représentée dans sa structure simple ci-après propose les trois étapes ordonnées : le but, le défi, la récompense. Elle doit être exécutée complètement pour ne pas frustrer le joueur.



Figure 128 : Exemple de jeu simplifiée

Comme illustré ci-dessous, il existe différents types de boucles pouvant s'imbriquer pour structurer le jeu. La boucle micro représente une étape dans le jeu, la boucle moyenne traduit un niveau dans le jeu et la boucle macro constitue le jeu dans son entier.

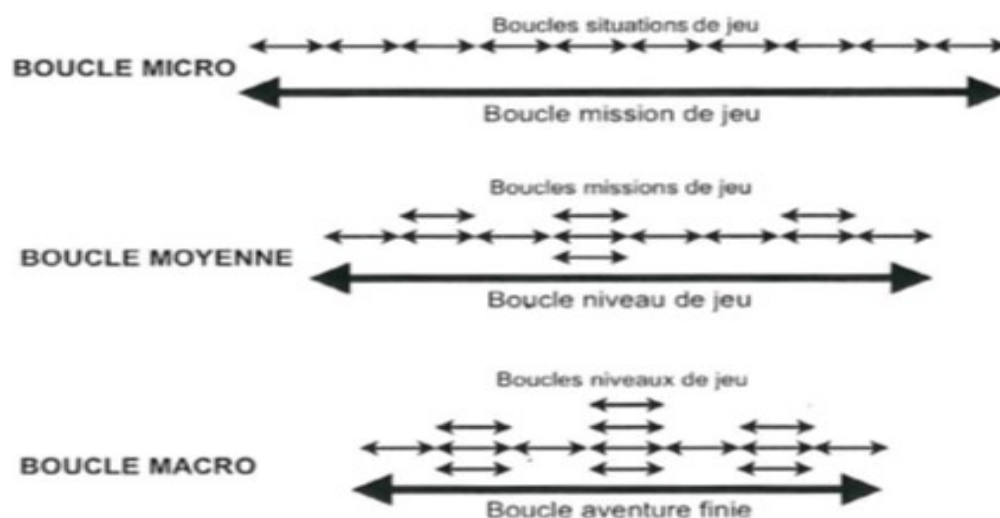


Figure 129 : Différents types de boucles de jeu

- b) Le micro-gameplay se définit comme la notion de période de temps, de zoom sur le jeu et répond à ce qui se passe à des instants donnés, aux possibilités offertes au joueur, ce qu'il va faire, comment il va faire, les moyens mis à sa disposition...
- c) Le micro-design permet de construire chaque instant des niveaux du jeu. C'est le processus qui génère à partir d'une unité de base, la brique de gameplay, des ensembles de plus en plus

grands jusqu'à la finalisation du jeu. La brique de gameplay construit une situation de jeu et peut être testée.

d) Le macro-design sert à bâtir la charpente du niveau.

Le schéma ci-après (Albinet, 2015) illustre de manière synthétique le déroulement du processus de création.



Figure 130 : Déroulement du processus de création

Ces différentes étapes nécessitent bien évidemment un développement approfondi.

5.4.2. Modèles

Comme nous cherchons à étudier et à prendre en compte les réactions physiologiques et psychologiques, une théorie permettant d'appréhender ces notions paraît appropriée. Il s'agit du flow. C'est ce que l'on ressent. Le flow est le résultat d'un plaisir vécu voire d'une forme d'extase pendant une activité. C'est Mihaly Csikszentmihályi (1975) qui le premier a décrit le concept de flow en 1975 et a poursuivi ses travaux avec plusieurs publications (1990, 1993, 2014) abordant les notions de créativité, de psychologie du bonheur.

Le premier modèle de l'expérience optimale (état de flow) s'illustre par l'adaptation graphique de Moneta (2012) ci-dessous. Il explique que le flow se situe entre l'anxiété et l'ennui à partir du moment où il y a correspondance entre le défi et les capacités de l'acteur. Dans cette situation, l'individu est capable de faire abstraction des aspects désagréables de la vie, de ses préoccupations...

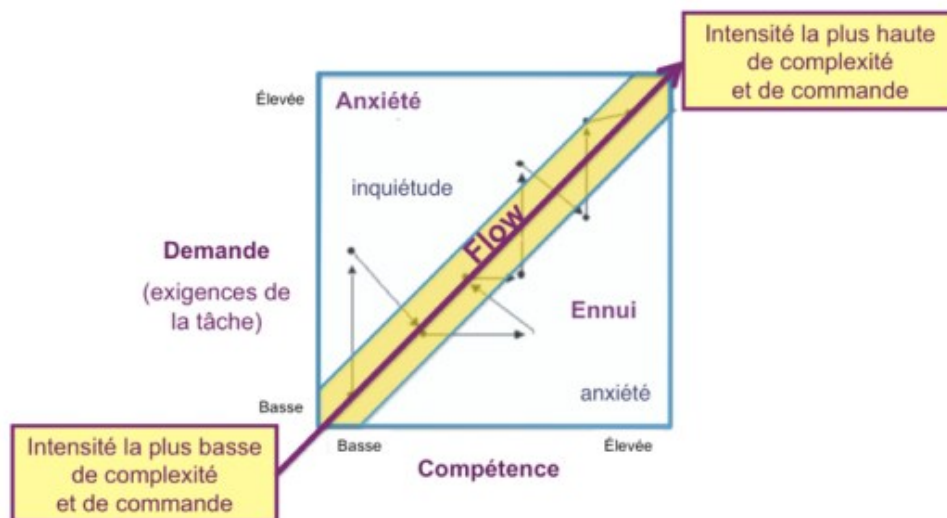


Figure 131 : Adaptation de Moneta de l'état de flow

Le flow est décomposé en trois parties :

- Les antécédents : objectifs et feedback précis, défis adaptés
- L'expérience : combinaison des actions en conscience, sens du contrôle de l'activité et concentration
- Les effets : expérience intérieure

Les deux premières parties sont relatives aux conditions du flow alors que la dernière détient les déterminants du flow.

L'état de flow entraîne des conséquences importantes : des performances meilleures (Jackson et Csikszentmihalyi, 1999), une plus grande créativité (Csikszentmihalyi, 2013), un développement des capacités plus grand, une meilleure estime de soi et une réduction du stress (Csikszentmihalyi, 2006).

Jean Heutte, spécialiste de la modélisation théorique de l'autotélisme-flow, désigné comme l'expérience optimale, dans l'éducation, propose une vision relative aux émotions ressenties qui nous renforce dans notre démarche même si notre domaine est différent. « *Quant à l'émotion ressentie (cf. le flow) à ce moment-là, elle constitue l'un des moteurs de la persistance : si apprendre est rarement une partie de plaisir, comprendre (faire comprendre, être compris...) peut être totalement jubilatoire. Cette expérience est si gratifiante qu'elle justifie à elle seule que celles*

et ceux qui l'ont vécue (au moins une fois) se donnent parfois beaucoup de mal pour réunir toutes les conditions afin de pouvoir la revivre à nouveau »¹⁴⁹.

Jean Heutte est également un des auteurs de la définition retenue actuellement, depuis 2014, par l'*European Flow Researchers Network* (EFRN) en ce qui concerne le concept de flow : « *Il s'agit d'un état d'épanouissement lié à une profonde implication et au sentiment d'absorption que les personnes ressentent lorsqu'elles sont confrontées à des tâches dont les exigences sont élevées et qu'elles perçoivent que leurs compétences leur permettent de relever ces défis. Le flow est décrit comme une expérience optimale au cours de laquelle les personnes sont profondément motivées à persister dans leurs activités. De nombreux travaux scientifiques mettent en évidence que le flow a d'importantes répercussions sur l'évolution de soi, en contribuant à la fois au bien-être et au bon fonctionnement personnel dans la vie quotidienne* » (EFRN, 2014, traduction Heutte, 2017a, p. 170) ».

On peut donc dire qu'il s'agit d'un état dynamique de bien-être, de plénitude, de joie, d'implication totale. Ce sentiment cause un ordre, une harmonie, un équilibre dans notre état de conscience et renforce la structure de soi. On peut indiquer que lorsqu'un individu peut affronter la vie avec un bel enthousiasme et une grande implication, sans autre but que le plaisir de vivre pleinement toute activité pour lui-même, c'est une personnalité autotélique¹⁵⁰ (qui s'accomplit par elle-même). C'est un effet que nous cherchons aussi à offrir dans la construction d'une expérience de jeu pervasive.

Comme le dit Jean Heutte : « *Le flow serait ainsi l'un des catalyseurs fondamentaux des processus biologiques, culturels et psychologiques au cœur de l'évolution humaine* » et aussi que « *l'expérience du flow est une expérience autotélique se caractérisant par une récompense intrinsèque (self-oriented reward) impliquant un sens profond d'enjouement, de joie et d'enrichissement* ».

Appliquons-nous maintenant à examiner le flow dans les jeux vidéo. Un jeu étant « *un système dans lequel les joueurs s'engagent dans un conflit artificiel, défini par des règles, qui se traduit par un résultat quantifiable* » (Paras, 2005) la théorie du flow y prend tout son sens. Elle est en effet appliquée dans le jeu, plus spécifiquement d'un point de vue économique, afin de toucher les

¹⁴⁹ <https://sciences-et-bonheur.org/2017/09/18/jean-heutte-lenvironnement-optimal-dapprentissage-contribution-de-la-recherche-empirique-sur-les-determinants-psychologiques-de-lexperience-positive-subjective-aux-scienc/> - consulté le 30 août 2019

¹⁵⁰ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Autot%C3%A9lisme> : « L'**autotélisme**, mot composé de deux racines grecques *αὐτός / autós* (« soi-même ») et *τέλος / télos* (« but ») et signifiant « qui s'accomplit par lui-même », désigne une **activité** entreprise sans autre but qu'elle-même. Le terme s'applique aussi bien à des personnes qu'à des activités et il s'oppose à l'**hétérotélisme** » - consulté le 30 août 2019

différents types de joueurs. La figure suivante (Chen, 2007) traduit comment se place le flow dans ce contexte.

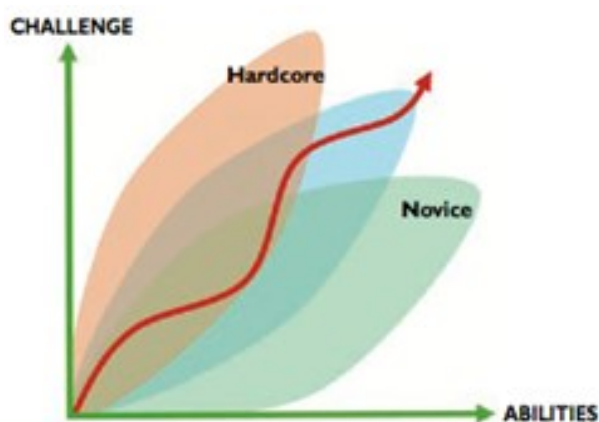


Figure 132 : Placement du flow suivant le contexte

Nous ne nous situons pas dans une économie de marché mais dans l'intention d'adapter le jeu au joueur en fonction de son état émotionnel donc de lui permettre de trouver un état de grâce, un état de flow, de gameflow¹⁵¹.

Le gameflow se fonde sur la théorie du flow adaptée aux jeux vidéo. Il s'agit de concevoir des situations compliquées pour le joueur et de le récompenser en conséquence dès lors que l'objectif est atteint. Bleszinski (2000) décrit le processus de résolution d'énigmes ou de défis à l'aide de récompenses comme le gameflow. Nous détournons légèrement cette vision en jouant sur l'état émotionnel plus que sur la difficulté même si la combinaison des deux est partie intégrante du jeu. Sweetser et Wyeth (2005) propose un modèle selon huit critères :

- La concentration : nécessité de se concentrer pour jouer
- Le défi : proposition d'épreuve à résoudre
- Les compétences du joueur : adaptation du jeu
- Le contrôle : sentiment de contrôle du joueur sur le jeu
- Les objectifs clairs : buts clairs et précis
- Le feedback : retour approprié au joueur
- L'immersion : expérience personnelle
- L'interaction sociale : relations potentielles avec d'autres joueurs

Le tableau¹⁵² ci-dessous montre les correspondances entre le flow et le gameflow.

¹⁵¹ <http://edutechwiki.unige.ch/fr/Gameflow> - consulté le 31 août 2019

¹⁵² <http://edutechwiki.unige.ch/fr/Gameflow> - consulté le 31 août 2019

Gameflow	Flow
Le Jeu	Une tâche qui peut être complétée
Concentration	Compétence de se concentrer sur la tâche
Défi des compétences des joueurs	Compétences perçues qui doivent correspondre à des défis (challenges) et les deux doivent dépasser un certain seuil
Contrôle	Autoriser à exercer un certain contrôle sur les actions
Objectifs clairs	La tâche a des objectifs clairs
Feedback	La tâche fournit une rétroaction immédiate
Immersion	Profonde, mais sans implication d'effort, elle réduit le souci de soi et le sens du temps
Interaction sociale	n/a

Tableau 33 : Correspondance entre le flow et le gameflow

Le flow adapté au jeu revient à proposer au joueur des choix tels qu'il puisse progresser en fonction de ses capacités et de ses envies. Il faut donc adapter le jeu au joueur. C'est ce à quoi nous aspirons par le biais des états émotionnels. Il est néanmoins nécessaire que tout reste transparent pour lui afin de ne pas impacter son défi, son expérience. Nous ne parlons pas non plus ici de l'adaptation de la difficulté du joueur même si celle-ci peut être prise en considération dans la conception de notre jeu mais de lui apporter des éléments, des défis en relation avec son état du moment.

En ce qui concerne le jeu pervasif, Jegus (2007) se fonde sur trois critères essentiels à sa conception :

- La persistance
- La liaison étroite entre monde réel et monde virtuel
- La grande interaction sociale liée au jeu

Sweetser et Wyeth (2005) énoncent en plus des huit éléments déjà proposés trente-six critères qui viennent compléter leur vision du jeu pervasif que nous n'énumérons pas.

5.5. Plate-forme de jeu pervasif pressentie

Notre jeu est à la confluence du jeu de rôle grandeur nature, de l'escape game ou encore d'un jeu à réalité alternée, utilisant différentes modalités donc est un jeu pervasif tel que défini. Il est dans un premier temps un jeu solo, mono-joueur, nous n'aurons pas d'interaction sociale. Tout comme le jeu vidéo, le jeu pervasif nécessite aussi un gameplay. Il est indispensable d'établir des règles, des histoires, des éléments de réussite ou non...

De nombreuses entreprises souhaitent inclure des éléments comme des lunettes de réalité virtuelle, des bracelets connectés... et agissent sur le comportement du joueur pour l'amener à certaines fins

ou lui demande de se contrôler. Elles peuvent entre autre utiliser ces dispositifs et relever tout au long du parcours des données relatives au joueur pour les utiliser ensuite dans différentes actions comme informer le joueur de son rythme cardiaque et agir en conséquence. On peut citer NaturalPad¹⁵³ ou Ironova¹⁵⁴. Nous n'avons pas la même approche. Notre but est d'adapter le jeu au joueur en lui proposant des événements en fonction de son état émotionnel soit allant dans le même sens de ce qu'il semble ressentir, parfois en lui soumettant des actions contraires pouvant de nouveau impacter son état. Ces différentes propositions peuvent ainsi orienter le jeu plus finement. Les réactions du joueur montreront si les suggestions sont de bon aloi ou pas.

Notre jeu s'appuiera sur une architecture client-serveur. Les données du jeu, du joueur ainsi que tous les outils associés seront centralisés sur un serveur. L'environnement dans lequel évoluera le joueur constituera le client.

Le jeu se déroulera dans une pièce fermée. Le but est de sortir de cette pièce. Pour cela, il est nécessaire de trouver la clé ouvrant la porte. Evidemment elle est cachée. Il est prévu plusieurs moyens d'ouverture. La réussite correspond à la sortie de l'espace. La défaite est atteinte dans différentes conditions : une mauvaise action, un délai dépassé ou un arrêt volontaire.

Au sein de la pièce se trouve un certain nombre d'objets :

- Des accessoires de décors : table, chaise, cadre, coffre...
- Des éléments interactifs disposant de différents capteurs : tactile (tissu, pression), sonore (voix, sons), visuel (leds, mouvement d'objets).

La trame de la narration est non linéaire. Nous souhaitons offrir plusieurs énigmes qui évolueront en fonction des états émotionnels du joueur si ces états sont parfaitement identifiés.

L'ambiance de la pièce est définie par son contenu. Des événements sont déclencheurs d'actions et d'interactions comme souffler, toucher, déplacer, parler, couper, taper des mains...

Les concepts du jeu seront précisés et développés plus finement avec l'aide de professionnels du domaine du game design. C'est une des futures étapes planifiées parmi les différentes réalisations que nous devons mettre en œuvre pour valider nos modèles et dispositifs.

5.6. Conclusion

Les modèles à suivre pour réaliser un bon jeu ne sont pas aussi faciles à mettre en pratique que sur le papier quand, dans le même temps, il faut intégrer l'état émotionnel du joueur. Cela passe par

¹⁵³ <http://www.naturalpad.fr/> - consulté le 7 septembre 2019

¹⁵⁴ <https://fundtruck.com/ironova/> - consulté le 7 septembre 2019

une conception rigoureuse tant en matière d’ergonomie, des logiques de jeu..., ou d’expérience de jeu. Notre jeu est à l’état d’ébauche car il nous manque encore la confirmation de l’identification d’états émotionnels à partir de mesures physiologiques choisies. Dans l’affirmative et grâce à des spécialistes qui nous prêteront mains fortes, nous devrions aboutir à un jeu pervasif nous dotant de tous les agencements et mécaniques nécessaires pour tester nos modèles. Ainsi la plate-forme opérationnelle, dont la structure de la plate-forme a été présentée dans le chapitre 3, figure 95, intégrant des capteurs de contact et les matériels distants capturant les données physiologiques nous permettra de confirmer ou d’infirmer si nous pouvons bien jouer avec les états émotionnels par ce biais, répondre aux attentes du joueur ou lui proposer une aventure adaptée.

5.7. Bibliographie

Albinet, M., (2015). Concevoir un jeu vidéo – Editions fyp

Ballagas, R. A., Kratz, S. G., Borchers, J., Yu, E., Walz, S. P., Fuhr, C. O.,... Tann, M. (2007). REXplorer: A Mobile, Pervasive Spell-casting Game for Tourists. In *CHI '07 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (pp.1929–1934). New York, NY, USA: ACM. <https://doi.org/10.1145/1240866.1240927>

Björk, S., Falk, J., Hansson, R., & Ljungstrand, P. (2001). Pirates! Using the physical world as a game board. In *IN PROCEEDINGS OF INTERACT 2001* (pp. 9–13). Japon: IOS Press.

Bleszinski, C., & Games, E. (2000). The art and science of level design. In *2000 Game Developers Conference Proceedings*.

Caillois, R., (1967). Les jeux et les hommes – Editions Folio essais

Chen, J. (2007). Flow in Games (and everything Else), Communications of the ACM, vol. 50 n°4

Csikszentmihalyi, M. (1975). *Beyond Boredom and Anxiety*. Jossey-Bass Publishers.

Csikszentmihalyi, M. (1990). *Flow*. New York: Harper et Row.

Csikszentmihalyi, M. et Rathunde, K. (1993). The measurement of flow in everyday life: Toward a theory of emergent motivation. In R. Dienstbier et J.E. Jacobs (Eds.), *Nebraska Symposium on motivation*, 1992. Lincoln and London: University of Nebraska Press.

Csikszentmihalyi, M. (2013). *Creativity*. New York: Harperperennial modern classics.

Csikszentmihalyi, M. (2014). *Flow and the Foundations of Positive Psychology*. Springer Netherlands.

Eyles, M., Eglin, R. (2007). Ambient role playing games: towards a grammar of endlessness, paper presented at Women in Games, Newport, South Wales, 19/04/07 - 21/04/07

Goria, S., Lejeune, F. (2017). Les marges du jeu à réalité alternée (JRA) : mise en évidence de cas d'indétermination créatrice et destructrice à partir de l'expérience d'*Alter Ego*, *Sciences du jeu* [En ligne], 7 | 2017, mis en ligne le 21 février 2017, consulté le 30 août 2019. URL : <http://journals.openedition.org/sdj/791> ; DOI : 10.4000/sdj.791

Heutte, J. (2017a). La persistance de la motivation et l'expérience du Flow : un cadre de référence pour l'étude du e-learning. Dans O. Las Vergnas (dir.), *Le e-learning informel*. Paris, France : Éditions des archives contemporaines. 170-186.

Huizinga, J., (1951). Homo ludens. Essai sur la fonction sociale du jeu - Collections Tel, Editions Gallimard Paris

- Jackson, S.A. et Csikszentmihalyi, M. (1999). Flow in Sports – The keys of optimal experiences and performances. *Human Kinetics*
- Khalfi, M.F., Benslimane, S.M. (2014). Systèmes d'information pervasifs : architecture et challenges. *UbiMob*.
- Khalfi, M.F., Benslimane, S.M. (2015). Evaluating Characteristics Adherence Level to Design Framework for Pervasive Projects. *International Journal of Advanced Pervasive and Ubiquitous Computing (IJAPUC)*
- Kourouthanassis, P.E., Giaglis, G., Vrechopoulos, A.P. (2007). Enhancing user experience through pervasive information systems: The case of pervasive retailing October 2007 *International Journal of Information Management* 27(5):319-335 - DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2007.04.005.
- Moneta, G. B. (2012). On the Measurement and Conceptualization of Flow. In S. Engeser (Ed.), *Advances in Flow Research*. New York: Springer. 23-50
- Paras, B. (2005). Game, Motivation, and Effective Learning: An Integrated Model for Educational Game Design. *DiGRA 2005: Changing Views: Worlds in Play, 2005 International Conference*. Simon Fraser University Surrey. Repéré à <http://summit.sfu.ca/item/281>
- Perez-Colado, V.M., Rotaru, D.C., Freire, M., Martinez-Ortiz, I., Fernandez-Manjon, B. (2018). Learning analytics for location-based serious games. *IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, DOI: 10.1109/EDUCON.2018.8363365.
- Stenros, J., Montola, M., Wærn, A., & Jonsson, S. (2007). Play it for Real: Sustained Seamless Life/Game Merger in Momentum. *DiGRA Conference*.
- Sweetser, P. W., Wyeth, P. (2005). GameFlow: a model for evaluating player enjoyment in games. *Comput. Entertain.* 3, 3 (July 2005), 3-3. DOI: <https://doi.org/10.1145/1077246.1077253>
- Yang, M.-J., Chen, J.-H., Chao, L. R., & Shih, T. K. (2009). Developing the Outdoor Game-Based Learning Environment by Using Ubiquitous Technologies. *Advanced Learning Technologies, IEEE International Conference on*, 270–272. <https://doi.org/http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/ICALT.2009.27>

5.8. Sitographie

Astic, I. (2013) - Jeu et société, jeu en société : le cas du jeu pervasif.
https://cedric.cnam.fr/fichiers/art_3627.pdf - repéré le 31 août 2016

Autotélisme. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Autot%C3%A9lisme> - repéré le 31 août 2019

Autotélisme-flow. <https://sciences-et-bonheur.org/2017/09/18/jean-heutte-lenvironnement-optimal-dapprentissage-contribution-de-la-recherche-empirique-sur-les-determinants-psychologiques-de-lexpérience-positive-subjective-aux-sciences/> - repéré le 30 août 2019

Gameflow. <http://edutechwiki.unige.ch/fr/Gameflow> - repéré le 31 août 2019

Conclusion

« Le temps met tout en lumière ». Thalès

Chaque chapitre a constitué une étape marquante de mes travaux de recherche. Côté l'humain sous différents angles de vision : biologique, physiologique, psychologique... dans son environnement, sa perception et son vécu, permet de mieux le comprendre, de répondre plus précisément à ses attentes, d'entrer en harmonie voire en « homéostasie » avec lui. Vouloir lui offrir du bonheur, le faire vibrer, lui procurer du rêve ou plus largement des émotions quelles qu'elles soient est une de nos ambitions. L'humain est vraiment au cœur de notre projet même si pour ce faire nous utilisons des technologies diverses portées par l'informatique et un univers un peu restreint pour une meilleure appréhension et compréhension que sont les jeux.

Notre but : proposer une nouvelle Interaction Homme Environnement dans les jeux vidéo et pervasifs avec rétroaction biologique et états émotionnels, a déclenché une vague de questions telles que :

- Peut-on découvrir des états émotionnels à partir de mesures physiologiques issues de bio-capteurs de contact ?
- Si oui, ces capteurs peuvent-ils être remplacés par des dispositifs distants, donc non invasifs, et produire les mêmes résultats ?

En parvenant à des résultats, rien n'empêchera de concevoir cette nouvelle interaction Humain Environnement avec rétroaction biologique adaptée.

Afin de mieux connaître l'humain sur le plan émotionnel, comportemental, nous avons pu entre-apercevoir dans le chapitre 1 sur les émotions l'étendue des approches qui finalement forme un tout. La partie sur les interactions, chapitre 2, devant être l'élément essentiel de communication est en fait un pas dans l'orientation et la proposition d'une liaison nouvelle entre l'individu et son environnement. Nos réflexions sur les dispositifs de remplacement a permis de mettre en avant certains mécanismes comme des caméras spécialisées ou techniques pouvant potentiellement satisfaire nos objectifs. Ces outils ont déjà été utilisés dans d'autres situations pour l'obtention de mesures semblables aux nôtres. Bien évidemment, l'interdépendance entre les acteurs et le système se matérialise par un réseau de communication décrit au chapitre 3. Là encore, plusieurs voies sont ouvertes quant au choix des technologies et processus de mise en œuvre. Néanmoins, à minima, nous disposons d'une architecture viable à optimiser. Ce réseau est fondamental pour la captation des événements, des données et en particulier des données physiologiques. La considération de ce type de mesures sélectionnées n'est pas arbitraire. Les mesures ont mûrement été sélectionnées et évaluées pour leur potentialité à supporter la détection d'états émotionnels. Elles ont également été

retenues en fonction des dispositifs nécessaires d'acquisition aisée, à un coût raisonnable. Au travers des données physiologiques, c'est l'humain qui parle sans détour, en toute inconscience, et transmet des informations internes, traduction de son ressenti qu'il faut décrypter. C'est là qu'entre en jeu l'analyse des données mise en œuvre au chapitre 4. Tout comme l'intelligence artificielle nous offre des supports, des outils pour y aboutir.

Avant de dresser le bilan sur l'analyse de nos données, il est à signaler que, par exemple, pour le recueil de toutes les informations, les technologies et techniques ont évolué depuis le moment où nous les avons collectées puis utilisées. En effet, il existe aujourd'hui des outils gérant automatiquement la synchronisation entre les différents logiciels et dispositifs hétérogènes de captation. Nous avons dû réaliser cette synchronisation manuellement avec tous les risques que cela comporte même en étant rigoureux, à savoir un décalage de temps, aussi infime puisse-t-il être, pouvant se répercuter dans la lecture de la correspondance des événements aux mesures. L'innovation est sans cesse un support dans l'évolution des découvertes et nous y sommes très attentifs en matières de captation distante et de communication humaine.

Ceci étant dit, reprenons le fil concernant les données. Il a été nécessaire de faire des choix quant aux techniques utilisées. Ces choix se sont opérés assez naturellement du fait de nos orientations. En particulier, le mode non supervisé s'est imposé à partir du moment où nous avons décidé de laisser parler les données afin d'éviter certains travers, comme l'interprétation abusive et orientée des informations, même si parfois certains experts nous conseillaient vivement le mode supervisé. Nous avons malgré tout maintenu le cap. La thèse a pris, à ce moment-là, un tournant différent de celui envisagé à l'origine, de par le passage obligé par la fouille de données et le manque d'expérience dans ce domaine. Ce travail a constitué une partie conséquente du temps passé à l'achèvement de la thèse. Le but final des travaux est toujours d'actualité et la thèse n'est qu'une étape dans une plus grande aventure transdisciplinaire. L'analyse des données physiologiques, à l'aveugle, nous a mené à construire une méthodologie et à élaborer des algorithmes appropriés. C'est ainsi que nous avons façonné une méthodologie fondée sur l'auto-apprentissage avec l'algorithme de Kohonen et conçu une méthode hybride d'apprentissage profond pour la classification de données de ce type. Nous avons obtenu des résultats encourageants qui ne sont pas ceux escomptés mais qui nous confortent dans notre démarche qu'il faudra poursuivre. Les conclusions actuelles portent sur la capacité à reconnaître des individus et le classement des informations en états sans encore pouvoir explicitement les nommer. En effet, selon les événements vécus, nous constatons que les données issues de la combinaison de différentes

mesures physiologiques traduisent des changements d'états. Nous avons déjà entrepris des actions dans la continuité des techniques rapportées. Un article sur l'association des techniques de type logique floue avec l'algorithme de Kohonen est en cours de finalisation.

A court terme, notre travail va consister en la finalisation de ce modèle en logique floue. A moyen terme, nous continuerons l'étude à l'aide des chaînes de Markov cachées. Ces différentes méthodes et techniques abordées ou créées seront comparées voire combinées dans le but de répondre à la question de l'identification des états découverts. Grâce à cela, nous pourrions envisager l'utilisation de dispositifs distants et étudier leur équivalence en terme de mesures, en pratiquant de nouvelles expériences. Selon les résultats, à long terme, nous construirons tout l'environnement. Nous reprendrons aussi l'analyse des données qualitatives afin de la juxtaposer à celle des données quantitatives.

Dans l'état actuel du travail, des résultats obtenus et d'un point de vue plus prosaïque, toute personne voulant aborder des données du même type que les nôtres peut appliquer nos méthodes et algorithmes qui offrent de bons résultats de classification évitant certains biais.

A termes, ces travaux pourraient apporter une nouvelle approche dans la création et la conception d'objets, d'outils, de technologies, d'applications ... anthropocentrée et aussi à la connaissance de soi pour une autre forme de communication. C'est l'« esprit » de la vicariance¹⁵⁵ d'Alain Berthoz¹⁵⁶, dans toutes ses dimensions et sans limite. La vicariance est « *une grande propriété du vivant, et en particulier du cerveau humain : celle de créer des solutions élégantes compatibles avec nos croyances, nos projets, l'état de l'environnement, notre culture en somme* ». « *L'émotion est un acteur de la vicariance* ». Rien ne nous empêche d'envisager que l'activité électrique de notre corps pourrait voyager librement comme dans (Nicolelis, 2011)¹⁵⁷, être décryptée tels nos signaux physiologiques associés à des états émotionnels pour une communication, une interaction simplifiée par empathie¹⁵⁸ ou sympathie¹⁵⁹.

Les travaux menés dans cette aventure, que constitue cette thèse, ouvrent la voie à de nouvelles études ou applications pouvant contribuer à l'analyse des données, de nouvelles interfaces,

¹⁵⁵ « Cette vicariance, possibilité de remplacer une fonction par une autre ou de déléguer une fonction ou une action à un avatar virtuel, est bien une stratégie essentielle qui permet à notre cerveau d'appréhender le monde extérieur et de nous y adapter en permanence ». A. Berthoz

¹⁵⁶ La vicariance – Le cerveau créateurs de mondes, Alain Berthoz, Editions Odile Jacob, 2013

¹⁵⁷ Objectif télépathie, Miguel Nicolelis, Editions Flammarion, 2011

¹⁵⁸ Se mettre à la place de l'autre sans ressentir ses émotions, se mettre à la place de l'autre en restant soi-même

¹⁵⁹ Ressentir les émotions de l'autre sans se mettre à sa place

interactions Humain Machine, Humain Environnement, Humain Humain ... et finalement à ce que je nommerais l'affectique.

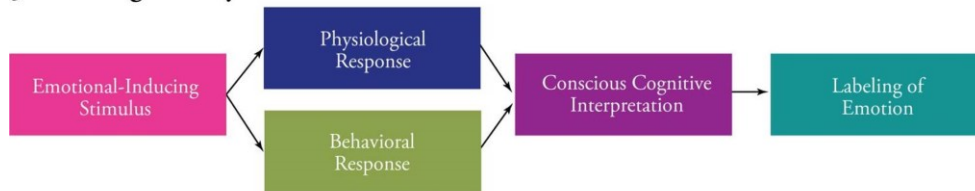
Annexes

Annexe 1 Tableau autour des émotions (Chapitre 1)

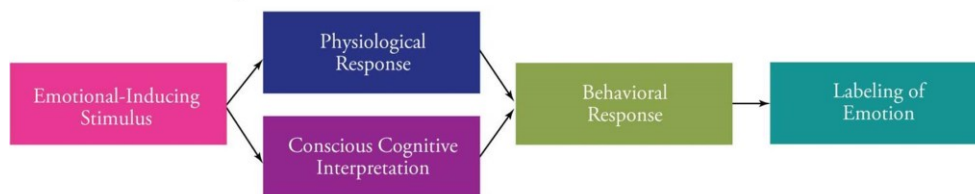
Affect	manifestation des émotions, des sentiments , de la motivation	Quantité d' énergie pulsionnelle et de ses variations	Manifestations affectives bivalentes		
Affectivité	réactions psychiques face à l'extérieur. Deux sortes : * de base, sentiments vitaux, humeurs , émotions * organisée et différenciée, passions, sentiments sociaux	phénomènes affectifs, ensemble des sentiments et émotions	Les psychologues et physiologues distinguent deux sortes d'affectivité		
Emotion	Fonction cognitive, prépare l'organisme à l'action	Emotion correspond à un ensemble de réponses de forte intensité comportant des manifestations expressives physiologiques et subjectives typiques			
Episode émotionnel	Episode émotionnel est une émotion rémanente	Situation déclenchante : modifications physiologiques , modification de l'action, modifications cognitives, modifications expressives, modifications subjectives	Après l'épisode émotionnel, manifestations de rémanence		
Etat affectif	Le sentiment désigne un état affectif	Les états affectifs recouvrent le concept d'émotion	Un état affectif soudain, accompagné de changements physiologiques , ou qu'il est ressenti comme un état affectif stable, sans réactions physiologiques soudaines.		
Etats d'âme	Sentiment d'arrière-plan	Climat mental, comme une météo états déterminés par notre passé et expériences antérieures affectives . Emotions au centre des états d'âme	« en ce qui concerne la vie de l'âme, il existe des dépendances « physiologiques » très profondes et qui, même, pénètrent d'une certaine manière tous les processus de conscience ». E. Husserl		
Etat émotionnel	Même schéma que l'épisode émotionnel	Exprime le mouvement, le changement comme le passage d'un état à un autre			
Humeur	Disposition de l' affectivité et du caractère	Selon hippocrate, les 4 grandes humeurs sont : le sang, la bile jaune, la bile noire et la lymphe pour définir le tempérament	Niveau affectif et émotionnel de base variant entre deux extrêmes		
Perception	Activité par laquelle un sujet fait l'expérience d'objets ou de propriétés présents dans son environnement.	perception consciente, perception inconsciente ou implicite ou subliminale	Fait appel aux sens physiologiques d'un organisme, à ses capacités cognitives		
Sensation	Produit une perception	Etat de conscience plus affectif qu'intellectuel	Emotion forte	Phénomène par lequel une stimulation physiologique externe ou interne provoque une réaction spécifique	
Sensibilité	Propriété d'adaptation	Rôle sur la pensée	Ensemble des fonctions de détection et de discrimination des caractéristiques physiques ou chimiques des stimulus		
Sentiment	Faculté de sentir, affects ou du domaine affectif , décharge massive temporaire, durée longue	Etat affectif complexe, assez stable, durable, concerne le moi ou autrui. Emotions conceptualisées déterminant un état affectif	Composante de l' émotion , ce qui implique des fonctions cognitives Perception de l'état physique du moment Sentiment différent de sensibilité	Le sentiment renvoie à la perception de l' état physiologique du moment	Synonyme d' émotion et aussi équivalent à état affectif Durée plus longue que dans l'émotion et teneur plus complexe et plus nuancée

Annexe 2 : Différents schémas de processus émotionnels (Chapitre 1)

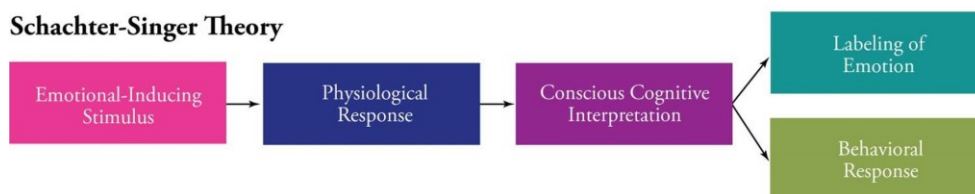
James-Lange Theory



Cannon-Bard Theory



Schachter-Singer Theory



<http://schoolbag.info/test/mcat/4.html> - consulté le 30 juillet 2018

Annexe 3 : Différentes théories des émotions (Chapitre 1)

THEORIES OF EMOTION REVIEW		
Theory	Explanation of Emotions	Example
James-Lange	Our awareness of our specific bodily response to emotion-arousing stimuli	We observe our heart racing after a threat and then feel afraid.
Cannon-Bard	Bodily response + simultaneous subjective experience	Our heart races as we experience fear.
Schachter-Singer	Two factors: General arousal + a conscious cognitive label	Arousal could be labeled as fear or excitement, depending on context.
Zajonc; LeDoux	Instant, before cognitive appraisal	We automatically react to a sound in the forest before appraising it.
Lazarus	Appraisal ("Is it dangerous or not?")—sometimes without our awareness—defines emotion	The sound is "just the wind."

<https://slideplayer.com/slide/9815630/> - consulté le 30 juillet 2018

Mnemonics to Help You Remember

James-Lange Theory

A comes before **E**
- just like Arousal comes before your Emotion.

J for Jog away from danger and **L** for Later feel your fear.

Cannon-Bard Theory

Say the two **Ns** in Cannon simultaneously just like you experience arousal and emotion

Cannon=Causes, Bard=Both;
so it would be the "Causes Both Theory" because the theory says that the physiological response and experience of emotion happen at the same time, or "the Cause stimulates Both at the same time.

Think Bard = Bird: You kill 2 birds with 1 stone
Theory says 2 things happen at once

If you get hit by a Cannon then you feel arousal, pain and scared all at once!

Schachter-Singer Two Factor Theory

Think "Exactor" meaning you double check your emotion by labeling the arousal just to be sure.

2-Factor = The emotion comes twice
Once when you actually experience the arousal and then again when you label the emotion of that arousal.

Lazarus Cognitive Mediation Theory

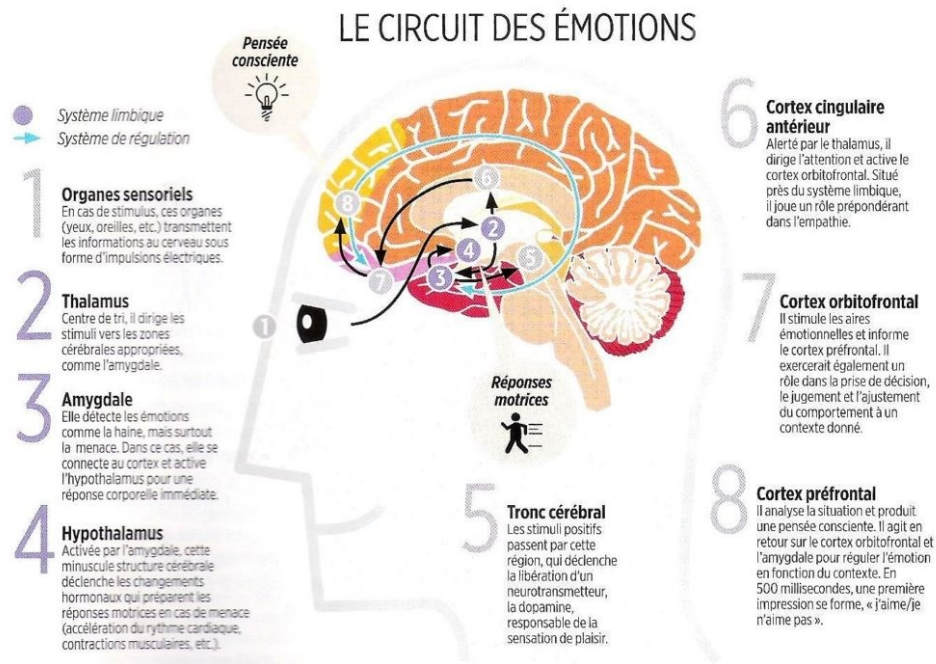
- You *meditate* on the situation before feeling emotion
- Lazy Emotion – Your emotions lazily wait for you to label the situation.
- Jesus raises Lazarus from the dead –
 - All those who witness this situation have to label it either a miracle and hence be overjoyed or label it a trick and be angry.

Zajonc & LeDoux Theory

- Zap! – Some emotions happen in an instant without thought.
- Z is lowest letter in the alphabet and fear takes the Low Road of neural circuits.
- LeDoux – Some emotions are like a Reflex

<https://slideplayer.com/slide/9815630/> - consulté le 30 juillet 2018

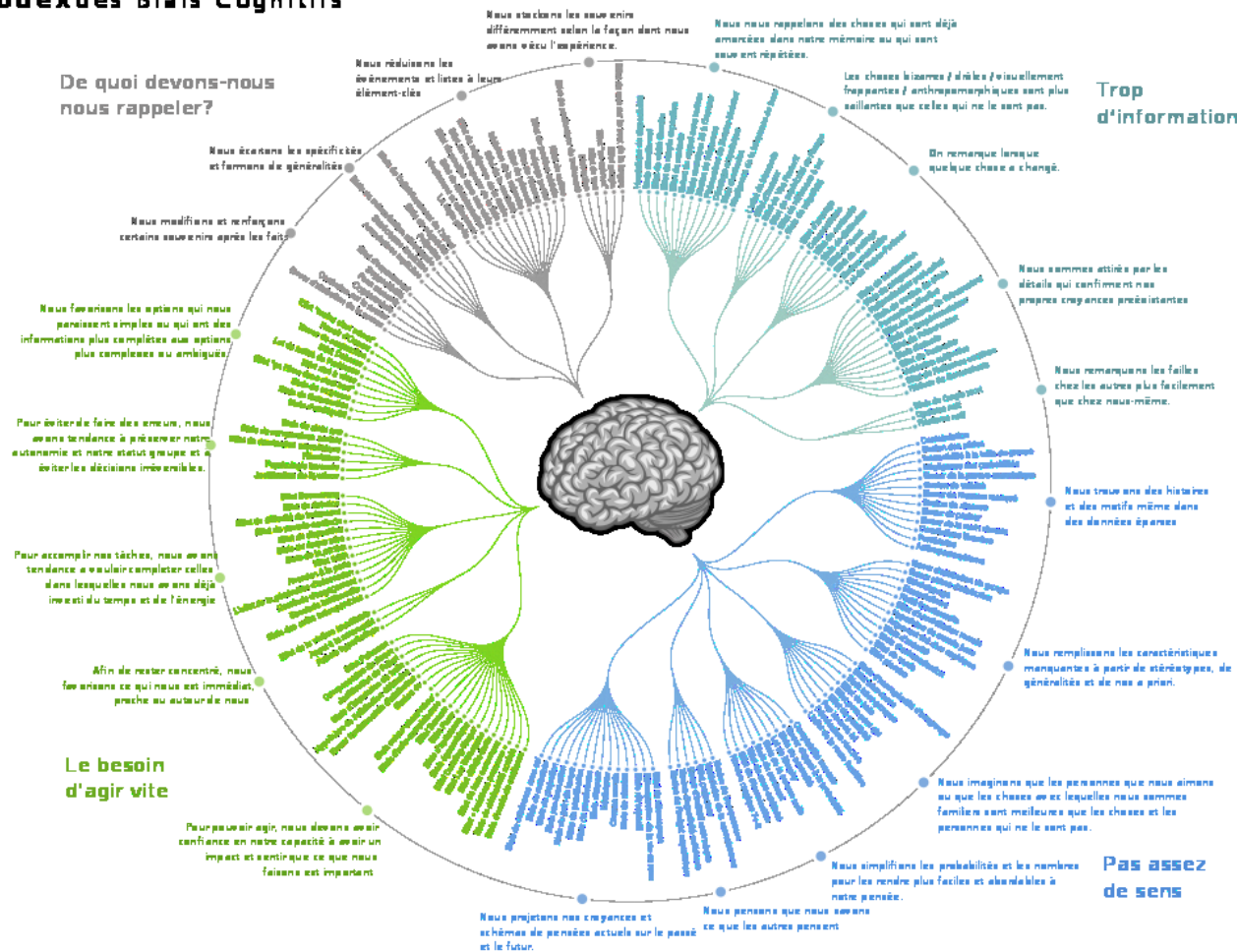
Annexe 4 : Le circuit des émotions (Chapitre 1)



<http://emo-rob.fr/emotions-que-se-passe-t-il-dans-notre-corps/> - consulté le 5 août 2018

Annexe 5 : biais cognitifs (chapitre1)

Codex des Biais Cognitifs



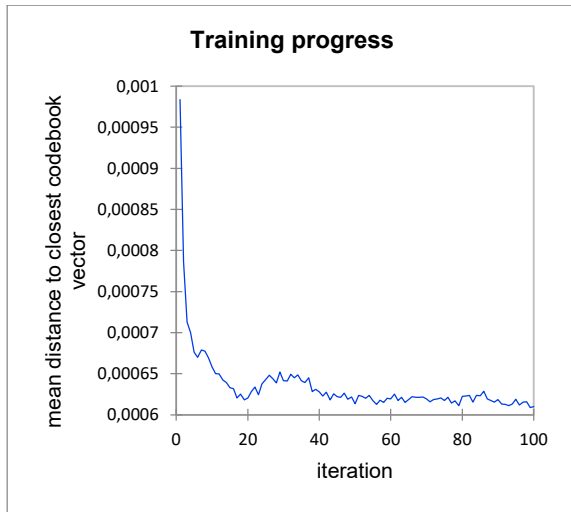
DESIGNHACKS.CO · CATEGORIZATION BY BUNTER BENSON · ALGORITHMIC DESIGN BY JOHN RANDOLPHSON (11/2017) · DATA BY WIKIMEDIA

CC BY-SA 4.0 attribution

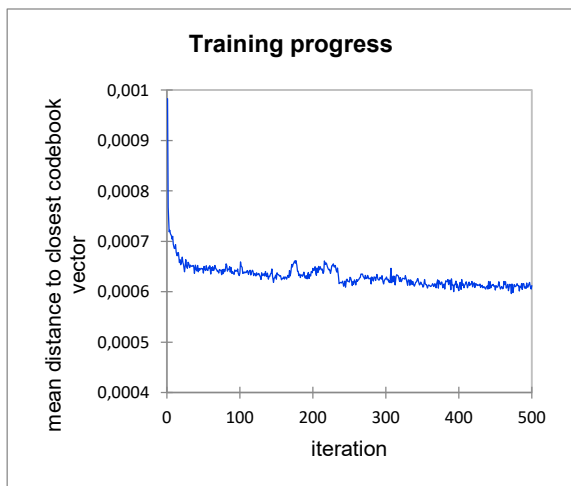
Par Jm3 — Travail personnel, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=58115523> – consulté le 5 novembre 2017)

Annexe 1 : courbes d'apprentissage (Chapitre 4)

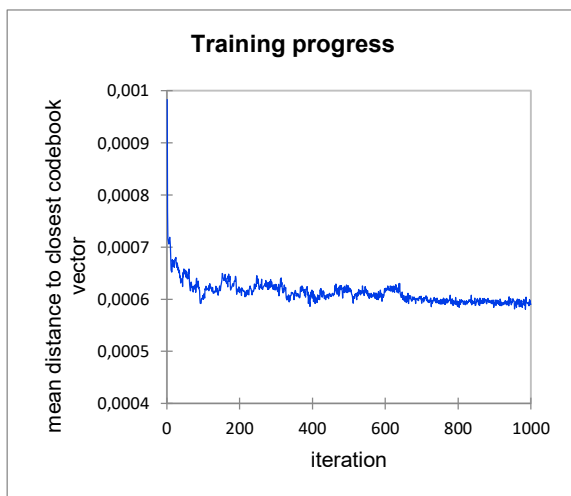
0.05 100



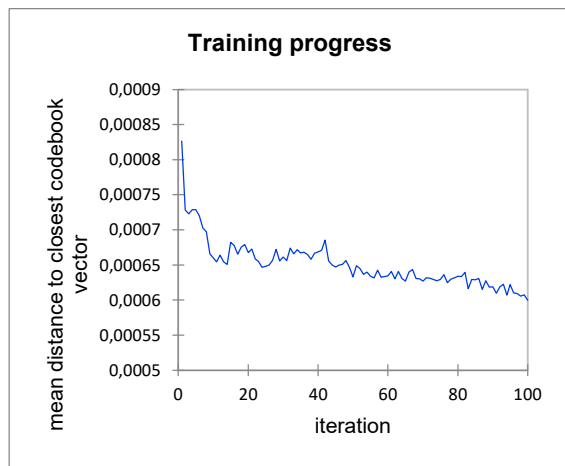
0.05 500



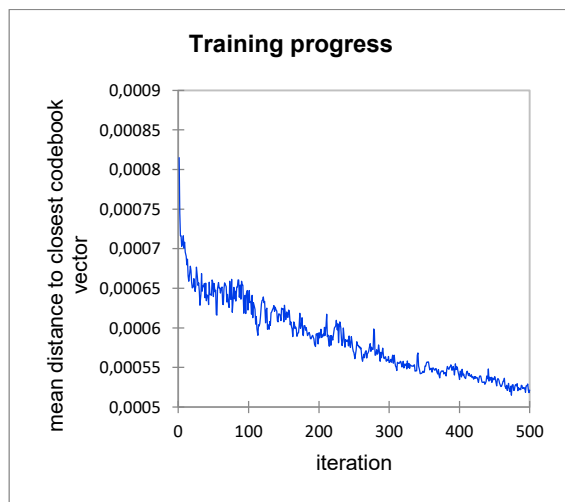
0.05 1000



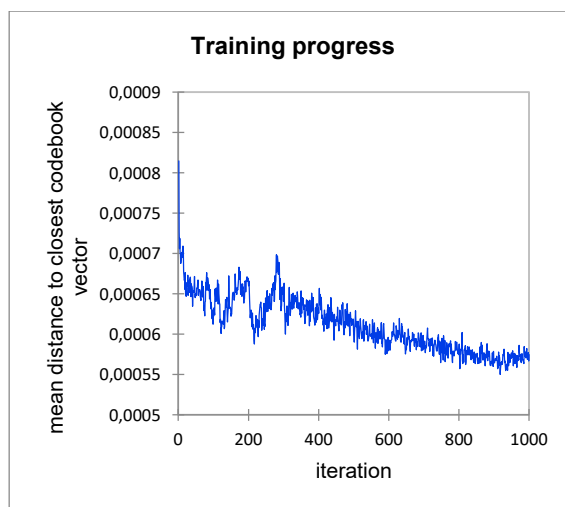
0.5 100



0.5 500

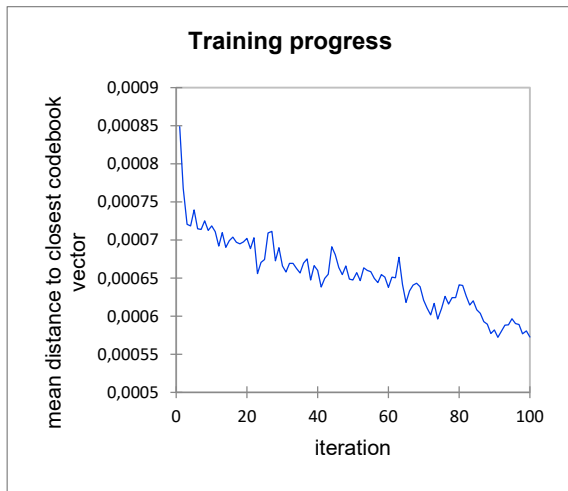


0.5 1000



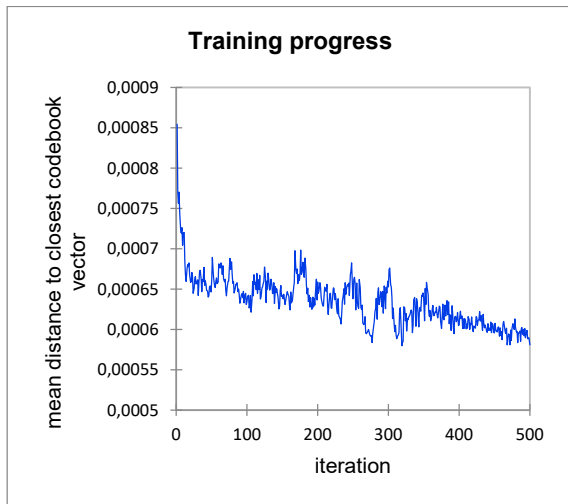
0.8

100



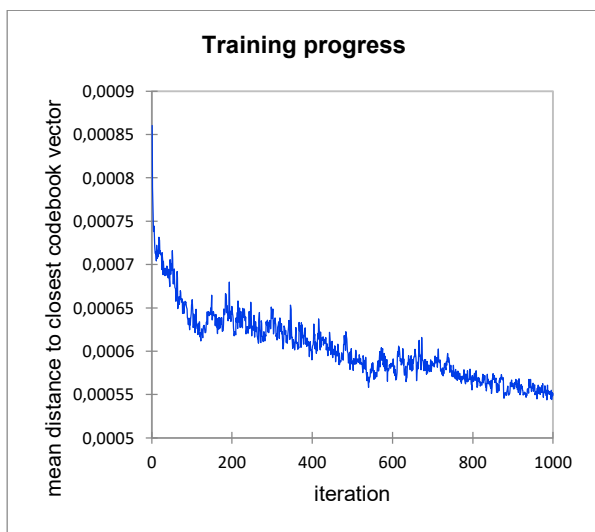
0.8

500



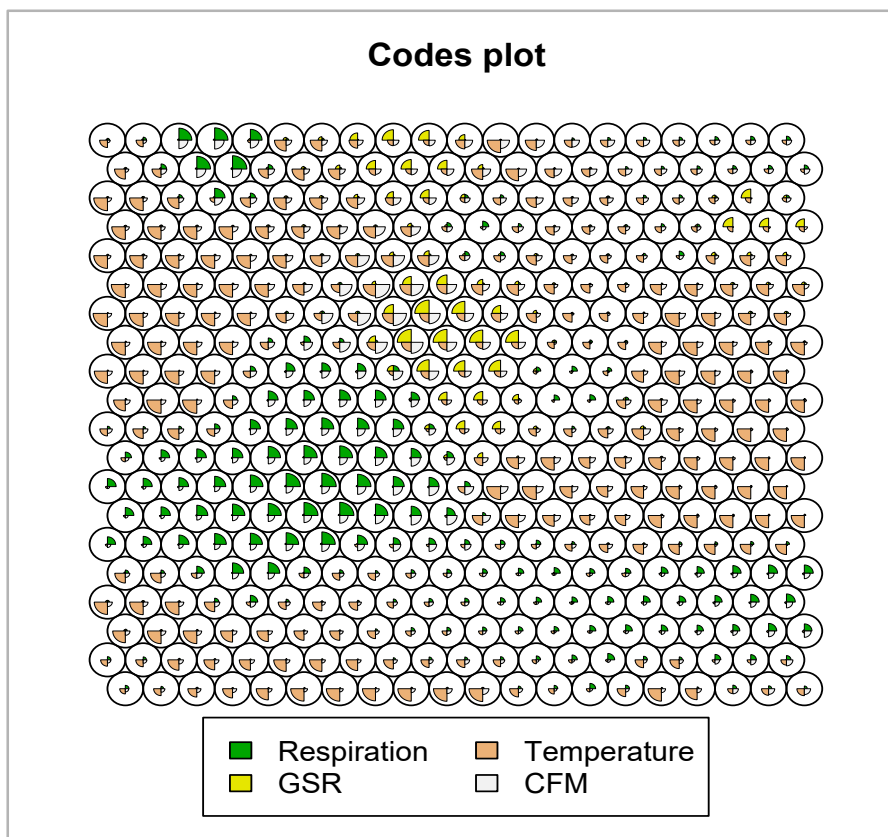
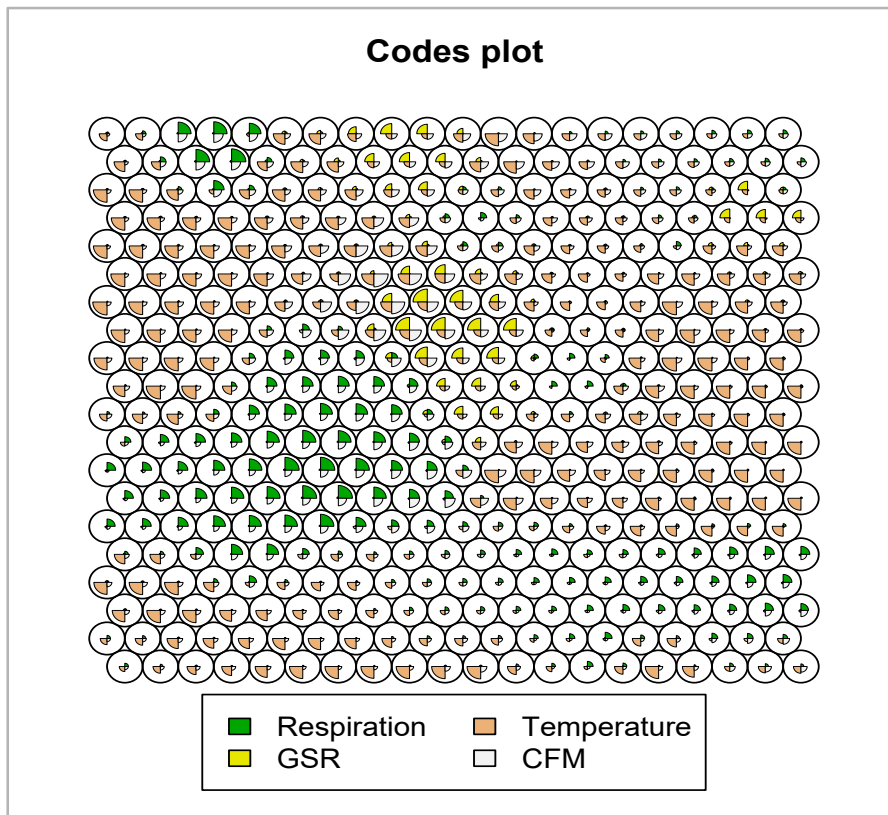
0.8

1000

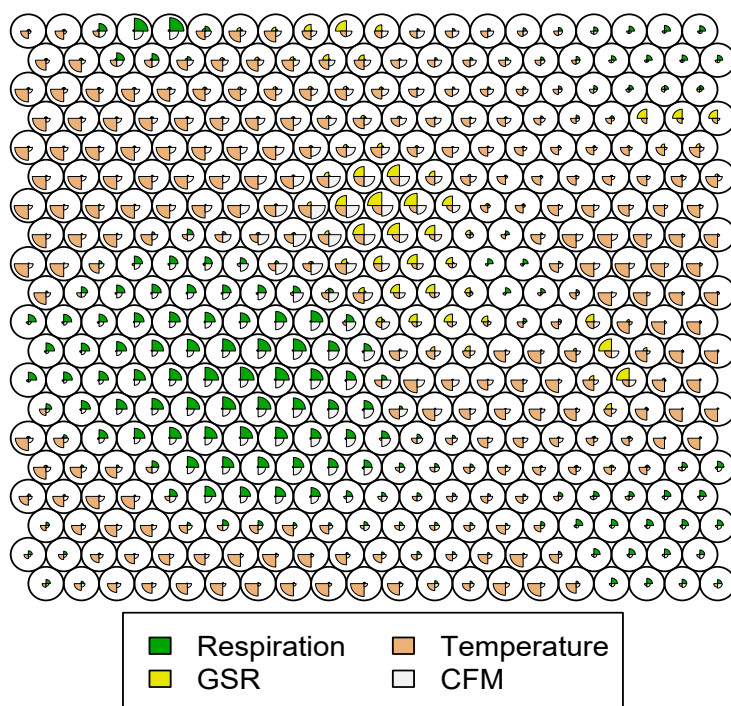


Annexe 2 : codes plot (Chapitre 4)

Premier cas

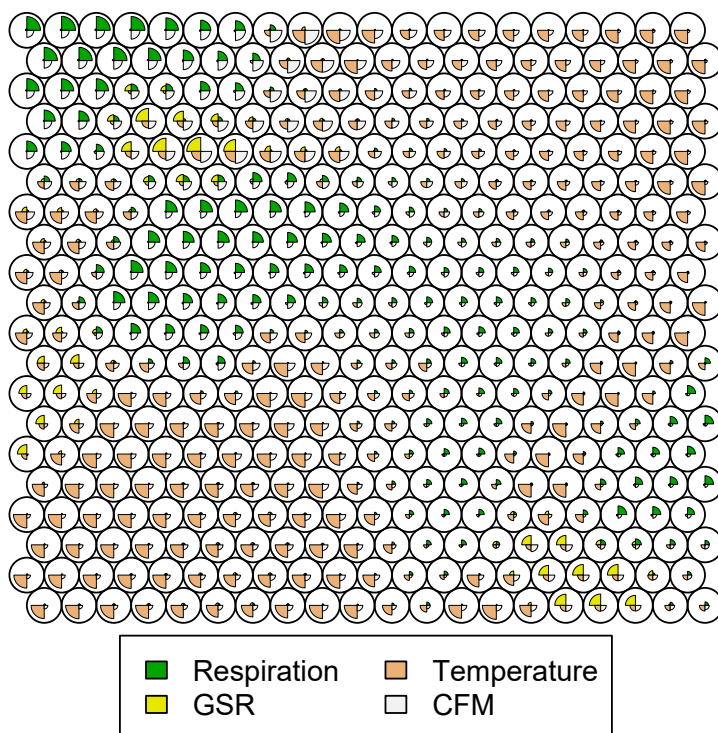


Codes plot

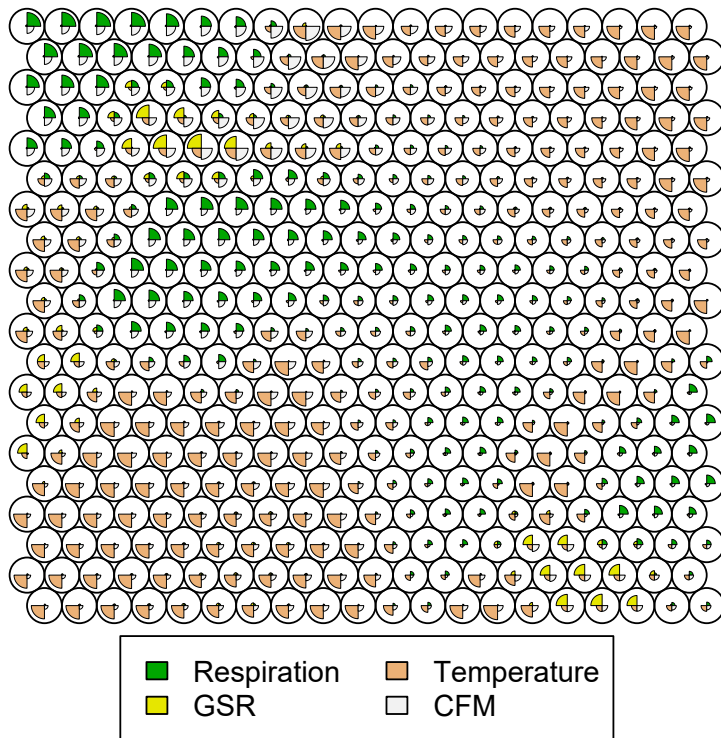


Deuxième cas

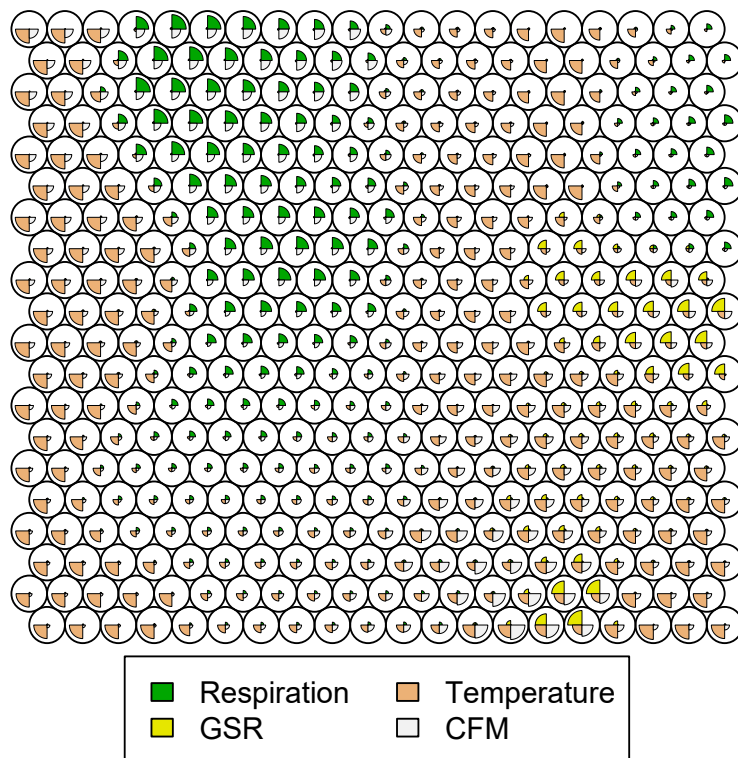
Codes plot



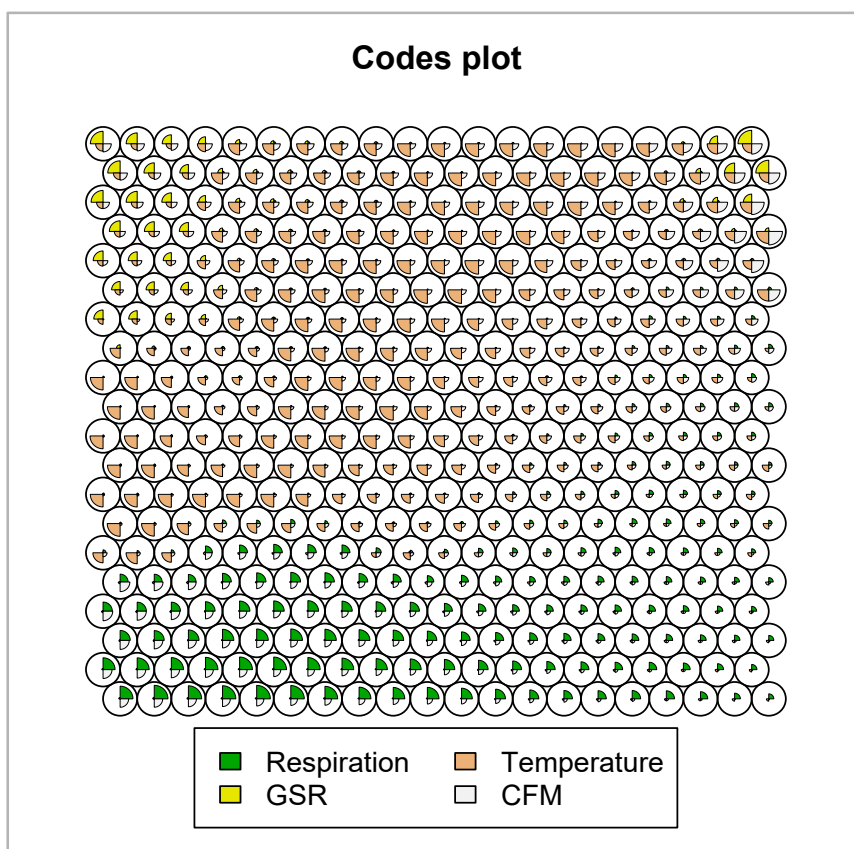
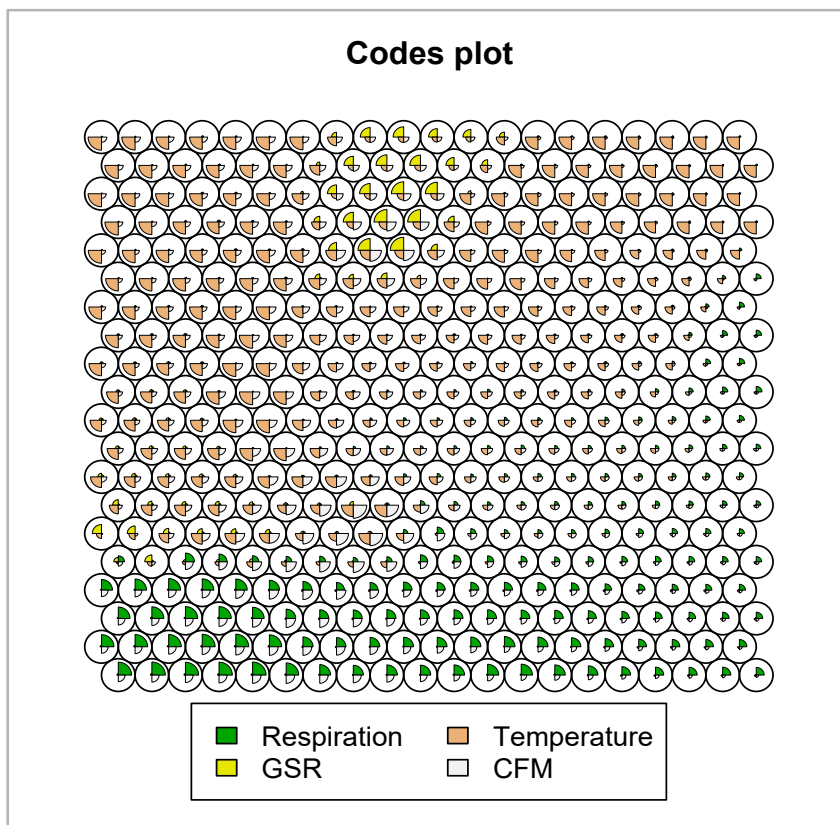
Codes plot



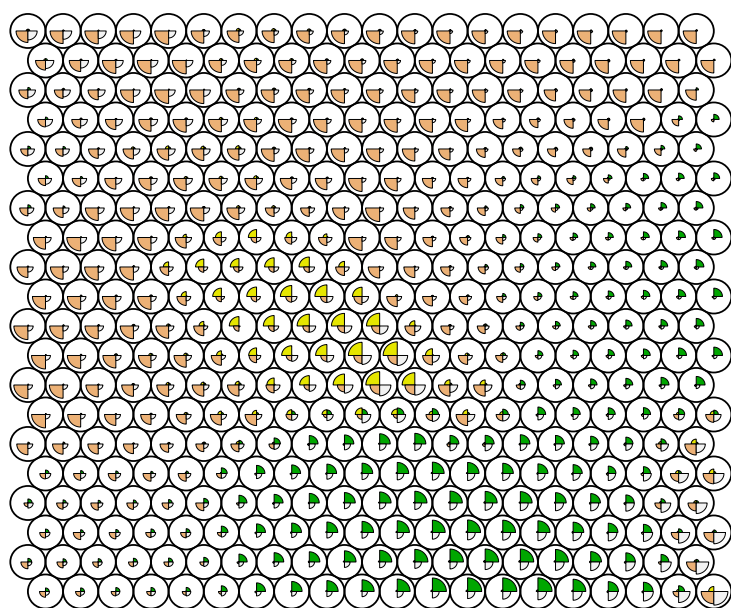
Codes plot



Troisième cas



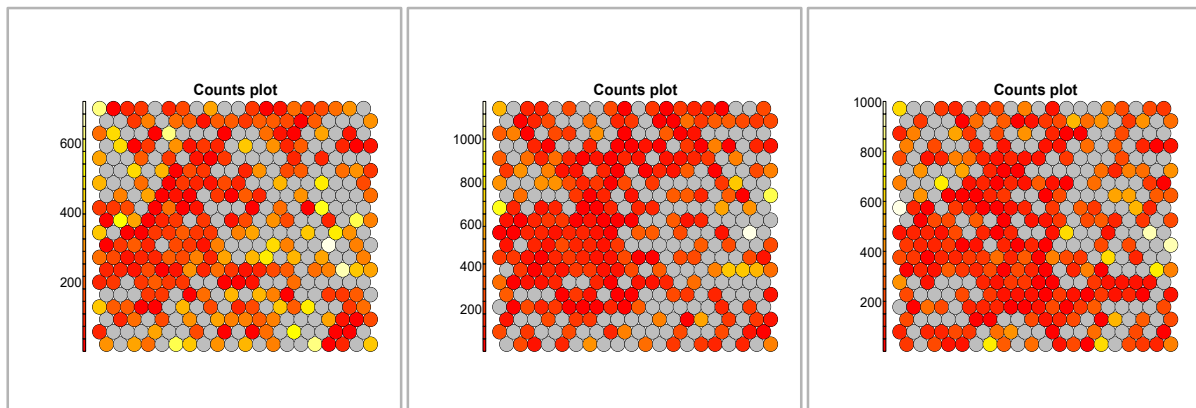
Codes plot



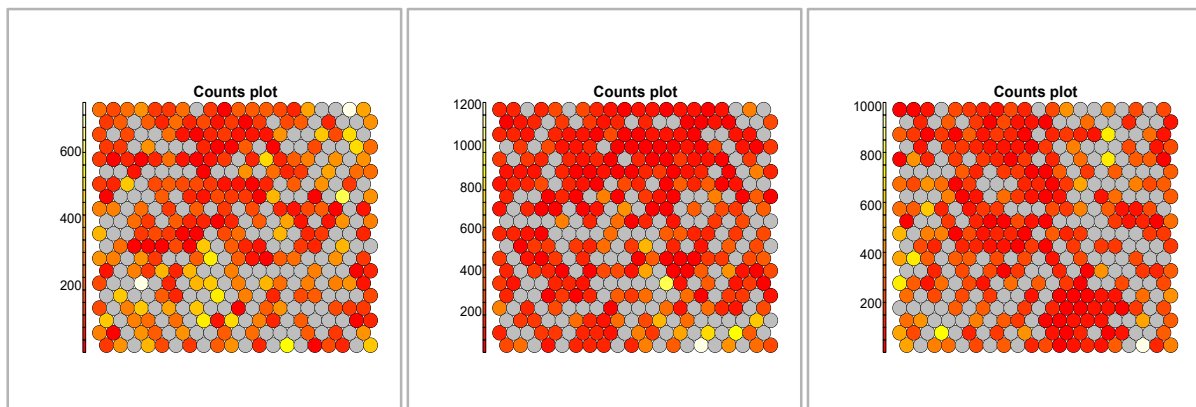
■ Respiration ■ Temperature
■ GSR ■ CFM

Annexe 3 : counts plot (Chapitre 4)

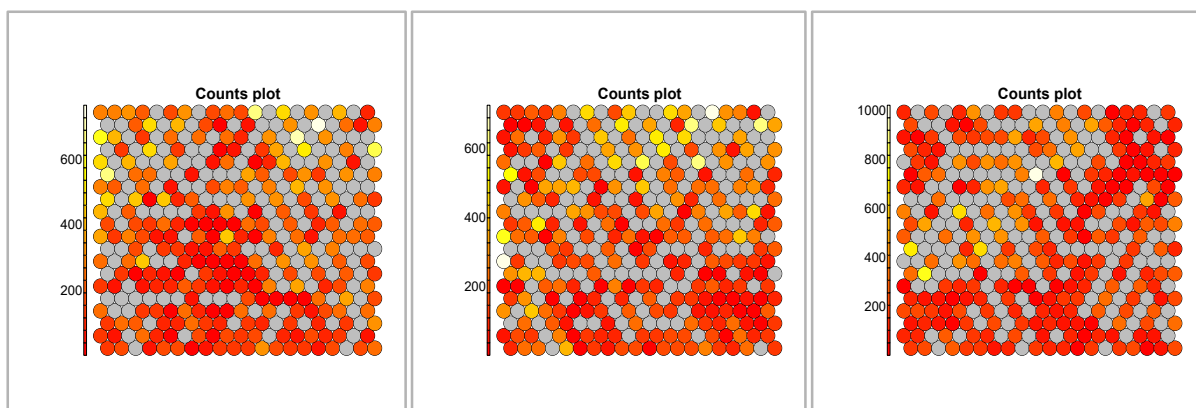
Premier cas



Deuxième cas



Troisième cas



Annexe 4 : Graphiques Xlstat des huit fichiers concaténés (Chapitre 4)

Data : Classeur = XP_groupés_V2.xlsm / Feuille = 8_XP_copie_complétée_Data_Manq / Plage = '8_XP_copie_complétée_Data_Manq'!\$A\$1:\$D\$310269 / **310268 lignes et 4 colonnes**

Observation labels : Classeur = XP_groupés_V2.xlsm / Feuille = 8_XP_copie_complétée_Data_Manq / Plage = '8_XP_copie_complétée_Data_Manq'!\$E\$1:\$E\$310269 / 310268 lignes et 1 colonne

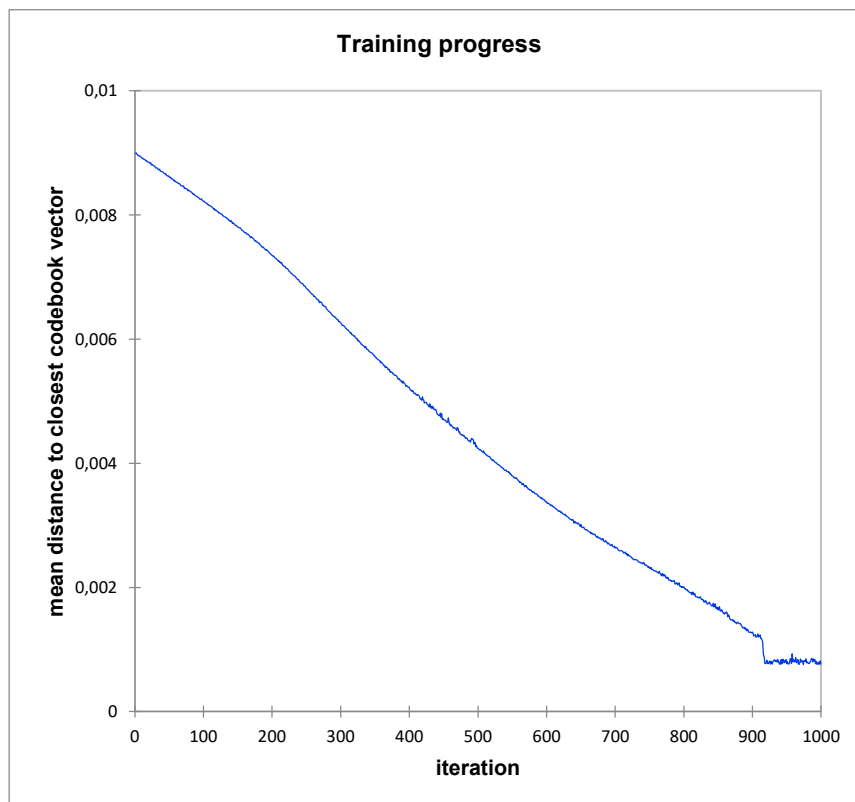
R function author : Ron Wehrens and Johannes Kruisselbrin

Standardize data : Oui

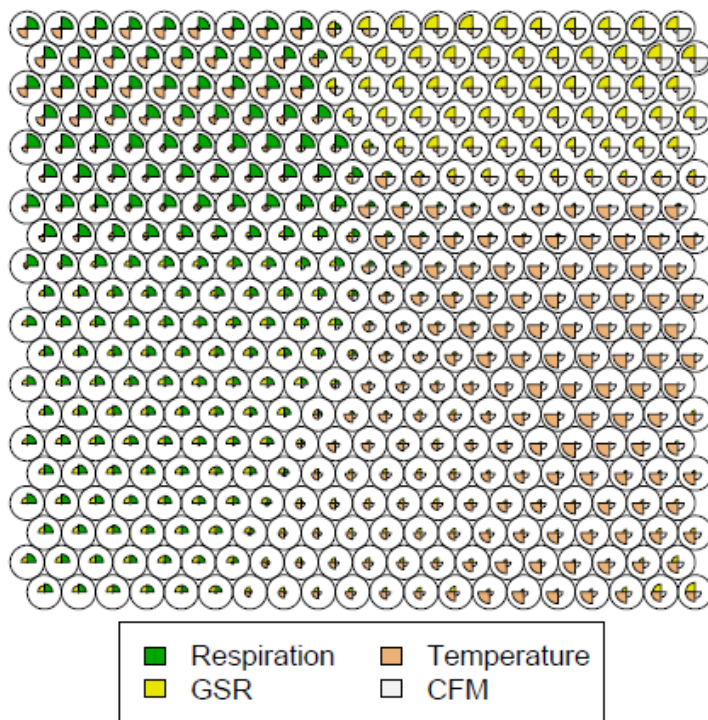
Presentation times : 1000 / alpha(min) : 0.5 / alpha(max) : 0.01

Mode : online

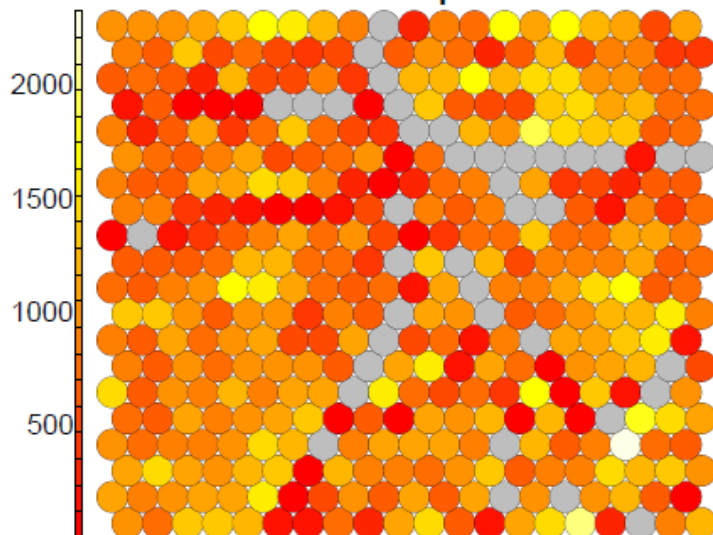
xdim : 20 / ydim : 20 / Topology : Hexagonal / Neighborhood function : Gaussian / Toroidal : Non



Codes plot

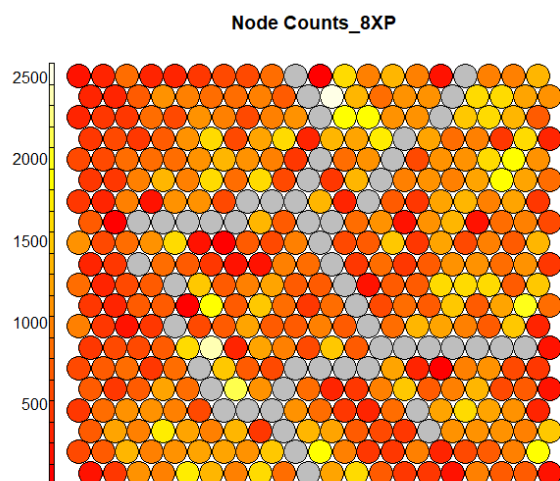


Counts plot

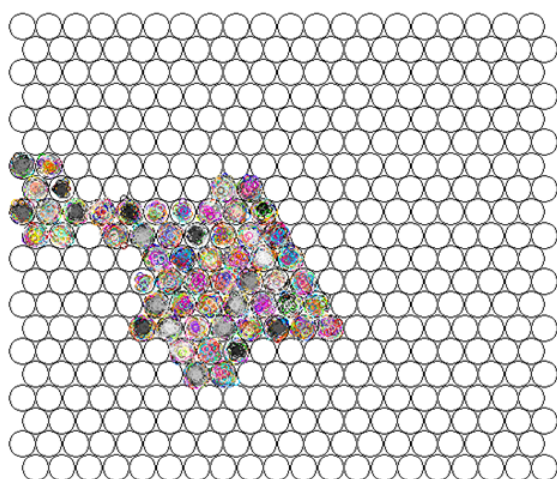


Annexe 5 : carte d'apprentissage des 8 fichiers et projection des 6 individus un à un sur cette carte (Chapitre 4)

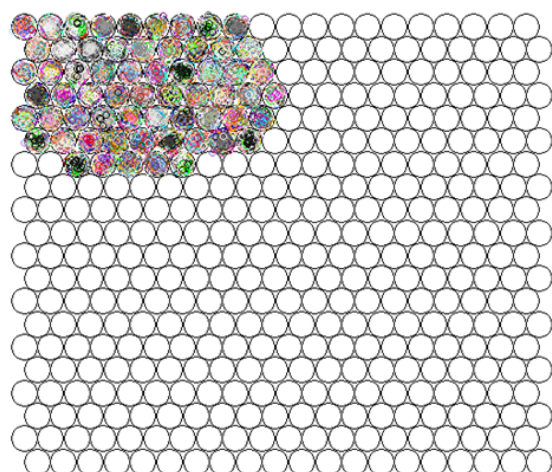
Visualisation de la carte d'apprentissage



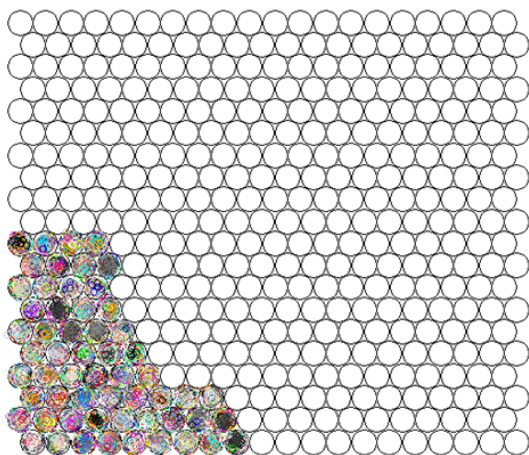
Projection du 1^{er} individu



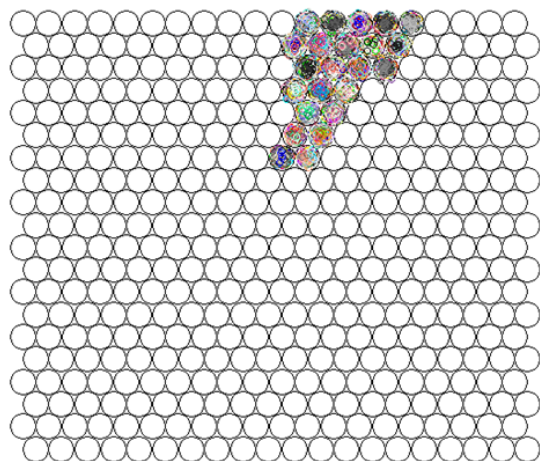
Projection du 2^e individu



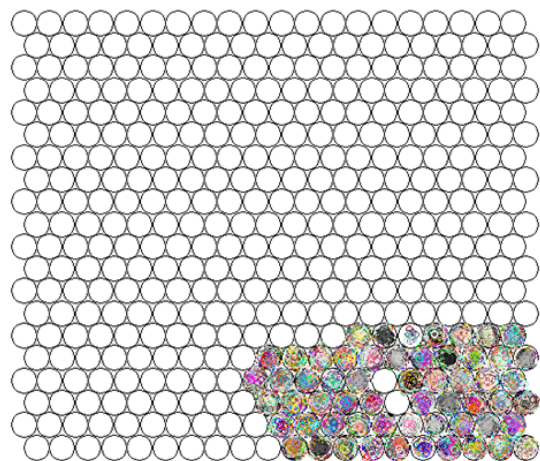
Projection du 3^e individu



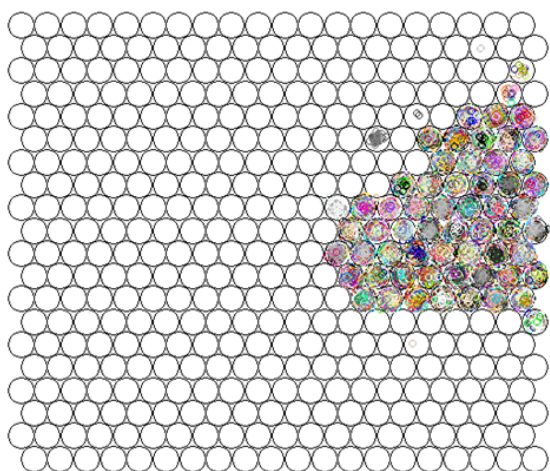
Projection du 4^e individu



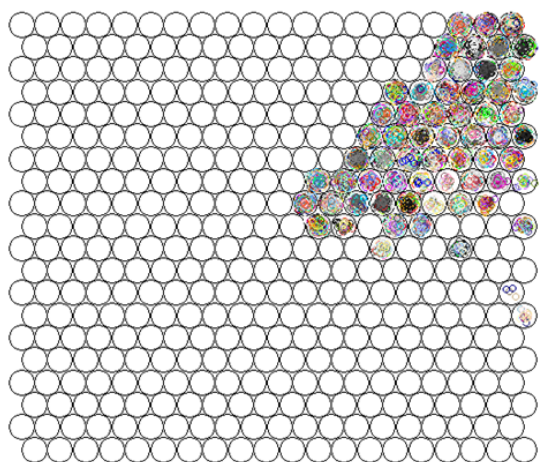
Projection du 5^e individu



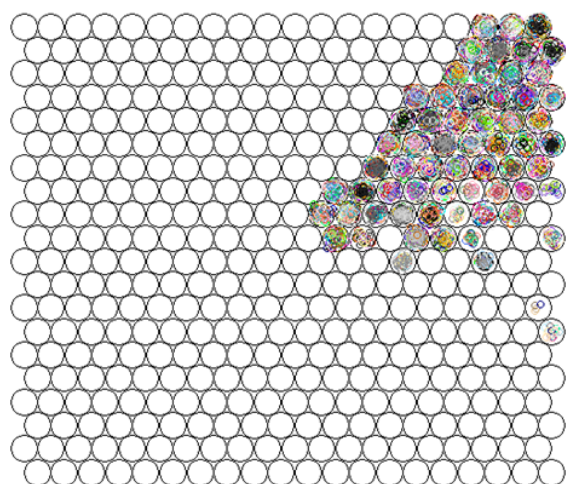
Projection du 6^e individu – expérience F



Projection du 6^e individu – expérience N

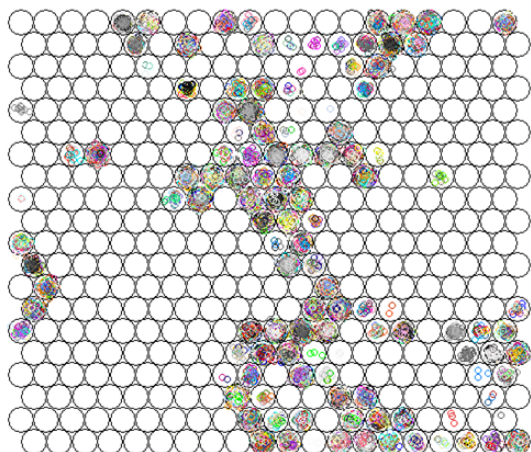


Projection du 6^e individu – expérience S

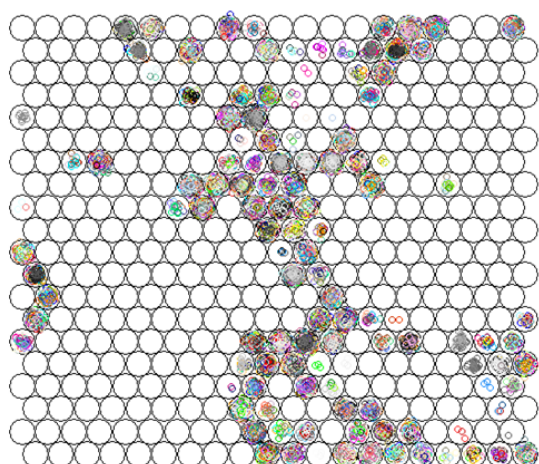


Annexe 6 : projection d'un nouvel individu (7) sur la carte apprise des 8 fichiers (Chapitre 4)

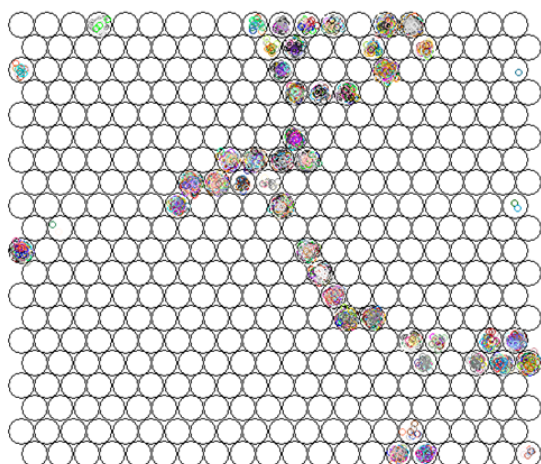
Expérience F



Expérience N

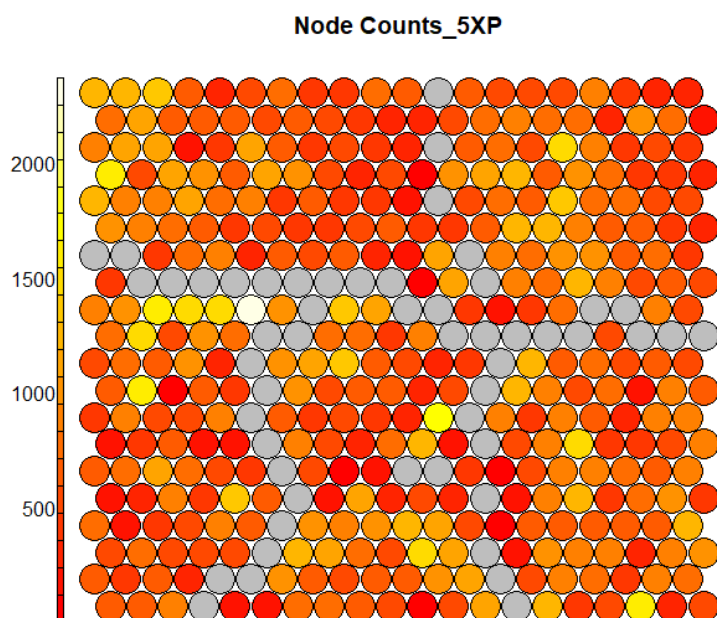


Expérience S

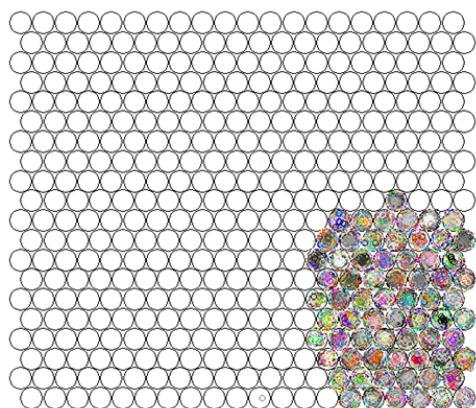


Annexe 7 : étude avec les cinq fichiers et une même expérience (Chapitre 4)

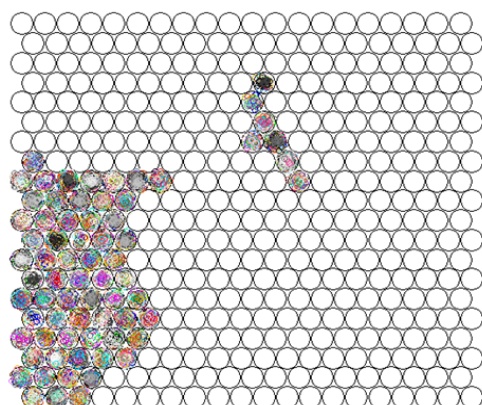
Carte SOM relative aux 5 fichiers (issus d'une même expérience suivie par cinq individus)



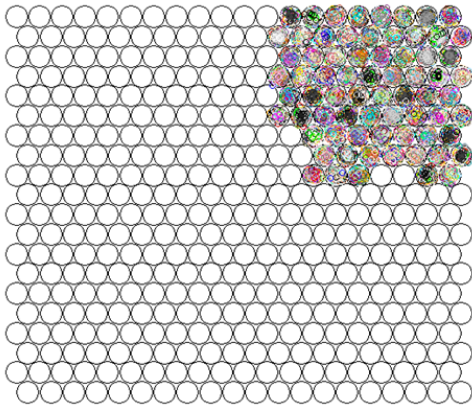
Projection du 1^{er} sujet



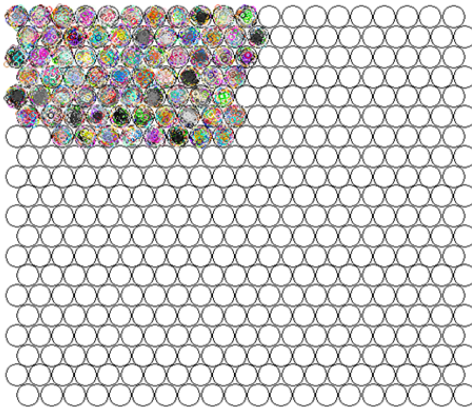
Projection du 2^e sujet



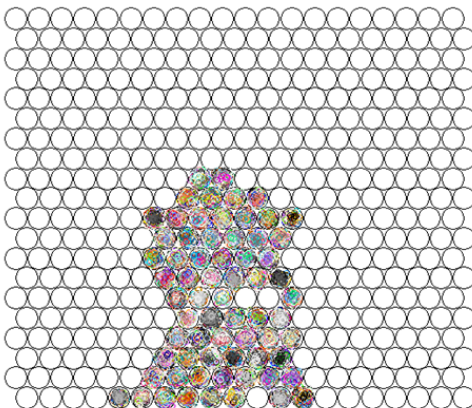
Projection du 3^e sujet



Projection du 4^e sujet

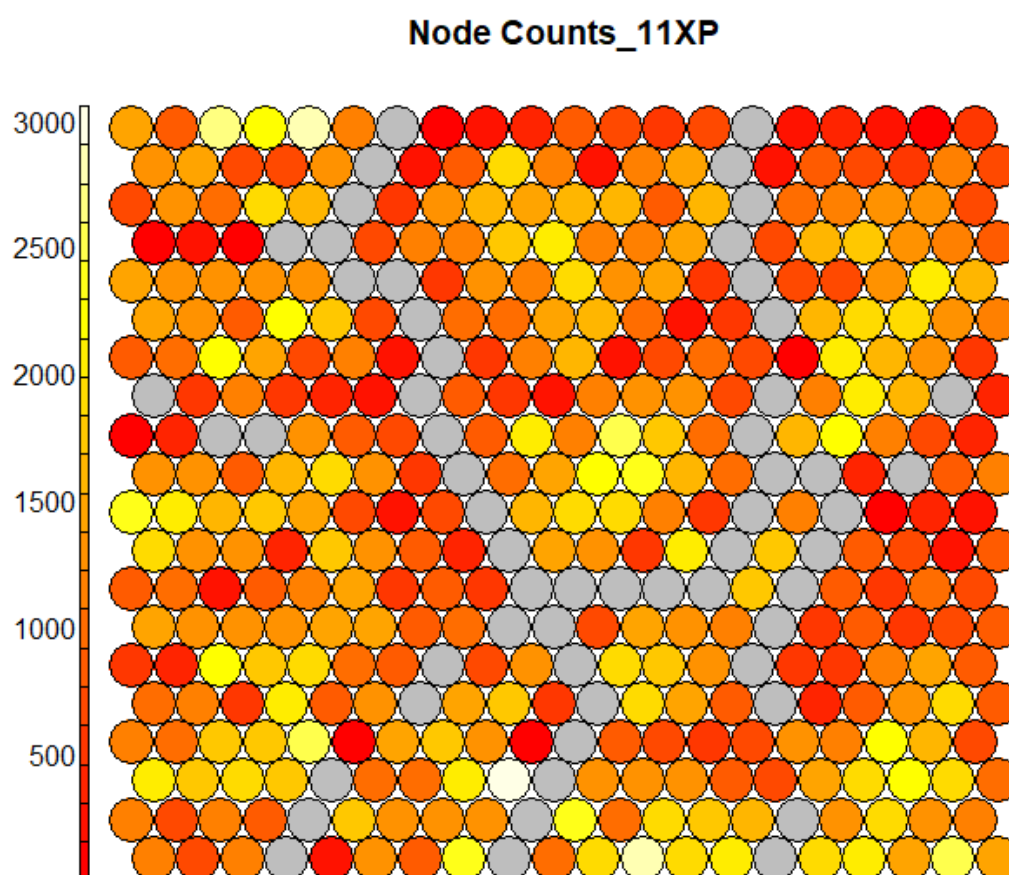


Projection du 5^e sujet

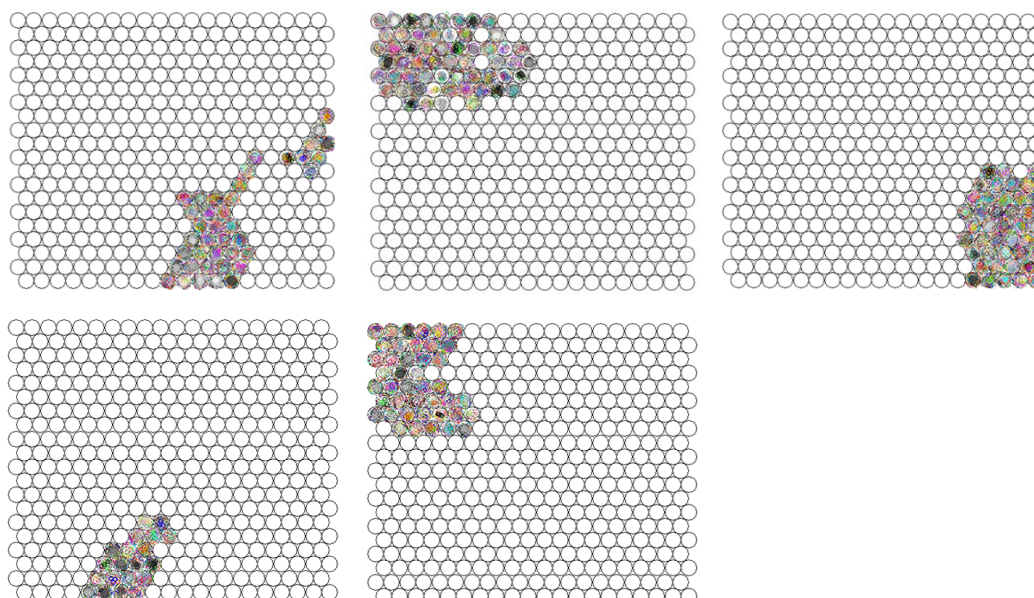


Annexe 8 : visualisation bilan des onze fichiers (Chapitre 4)

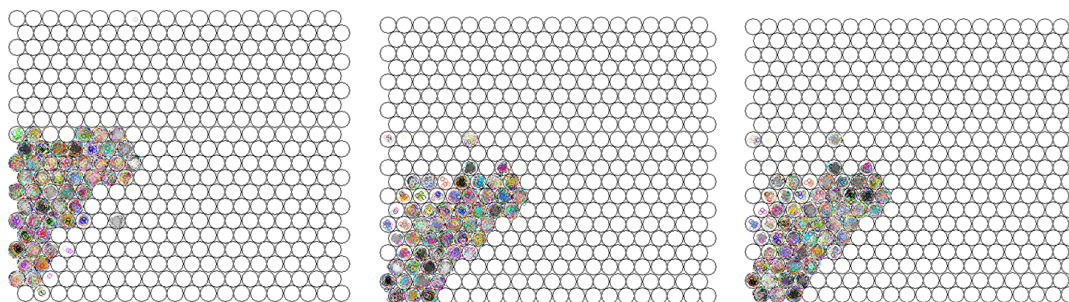
La cartes SOM des 11 fichiers concaténés



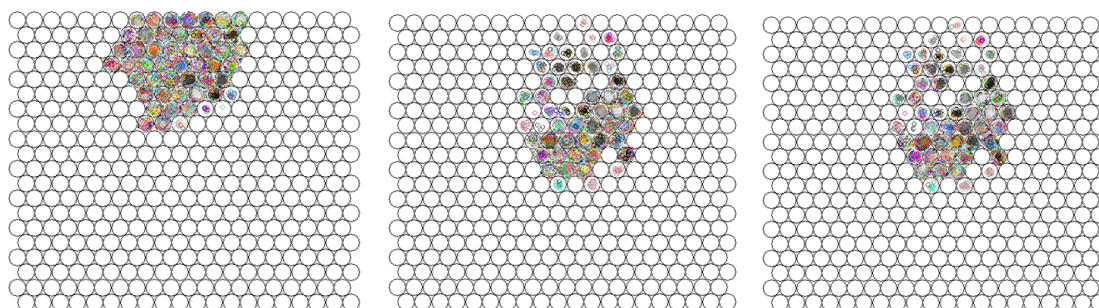
Les cinq premiers individus projetés sur la carte apprise



La projection du 6^e individu ayant participé à 3 expériences



La projection du 7^e individu ayant participé à 3 expériences



Annexe 10 : plan d'expériences et questionnaires (Chapitre 4)

Méthodologie

Nous avons donc décidé de réaliser un certain nombre d'expérimentations afin de récupérer des informations physiologiques et de les mettre en concordance avec les états émotionnels des utilisateurs (à savoir des joueurs). Notre premier objectif est d'établir une grille générique d'états émotionnels.

Pour ce faire, nous disposons d'un matériel fourni par la société TEA qui comprend un convertisseur numérique-analogique, des capteurs physiologiques sans fil (fréquence cardiaque, rythme et amplitude respiratoires, conductivité électrodermale et température). Un logiciel associé CAPTIV permet l'acquisition des données et, en fonction d'un certain paramétrage, une première analyse de ces données.

Le travail de base issu de ces mesures et analyses devrait nous permettre de lancer de nouvelles expérimentations avec d'autres dispositifs.

Nous disposons également de deux autres dispositifs : un physioscan muni d'un pack émotionnel et d'un casque neurosky. Le premier dispositif est utilisé avant et après les expériences. Le Neurosky fait partie d'une des expériences.

Expérimentations

1. Identification du protocole

Objet de la recherche : permettre l'établissement d'une cartographie des émotions ou états émotionnels à partir de bio signaux et observations.

Responsable : V. Gal

Support : humain

Calendrier : du 14/02/2014 au 09/03/2014

Liste des facteurs, des modalités et des études (lieux d'essais) :

- . facteurs émotionnels,

- . salle d'expérimentations = bureau aménagé

2. Thème de l'étude

Cette étude est menée suite aux résultats du projet PLUG non aboutis en ce qui concerne l'acquisition des données physiologiques et de leur analyse faute de la non disponibilité de capteurs

professionnels et de matériau. Il est donc fondamental de réaliser les mesures qui s'imposent pour nous permettre d'établir une classification associant les signaux et des états émotionnels.

Cette étape est indispensable, essentielle à la poursuite de la thèse. Elle constituera les fondements du travail sur des échanges d'informations sans capteurs physiologiques.

Il n'existe pas actuellement de classification de ce type.

On trouve d'un côté des émotions classées selon différentes théories, des mesures physiologiques relevées dans certaines expériences mais pas une association explicite des deux. Elle est plutôt établie en terme de valence (« plaisant », « déplaisant » ou « positif », négatif »). Nous souhaitons construire une grille, une cartographie associant plus précisément et exactement des données physiologiques à différents états émotionnels.

3. Objectif

Nous souhaitons mettre en regard les données obtenues des capteurs, les images enregistrées et les questionnaires recueillis des usagers.

Ensuite, ces données donneront lieu à des analyses en relation avec des techniques connues grâce à une collaboration avec des chercheurs du laboratoire travaillant dans le domaine des méthodes statistiques et d'apprentissage (MSDMA). La qualité des données sera aussi étudiée par une autre équipe du laboratoire oeuvrant en Ingénierie des Systèmes d'Information et de Décision (ISID).

4. Facteurs étudiés et à contrôler

Les facteurs à étudier sont les suivants :

GSR (Galvanic Skin Response) ou **RED** (résistance électrodermale) ou **RPG** (réponse psycho-galvanique) ou **AED** (activité électrodermale) : variation de la résistance électrique de la peau provoquée par l'activité des glandes sudoripares suite à une excitation sensorielle. L'activité électrodermale étant sensible à de nombreux stimuli comme une forte émotion, une douleur, c'est une méthode pertinente dans les réponses émotionnelles. L'unité de mesure est le micro Siemens (μS).

. **BPM** (battements par minute) ou **CFM** : pulsation cardiaque ou fréquence cardiaque. Il s'agit d'une variable sensible à de nombreuses stimulations et en particulier émotionnelles. L'unité de mesure est le battement par minute (BPM).

. **Respiration** : % de déformation lié à l'amplitude respiratoire. Cette variable peut nous renseigner sur l'adaptation de l'organisme face à des stimuli donnés. La fréquence respiratoire (FR) correspond au nombre d'inspirations et d'expirations par minute.

. **T°** : la température cutanée des extrémités. Les doigts sont une zone très innervée. L'unité de mesure est le degré Celsius ($^{\circ}C$).

Ces facteurs sont étudiés en corrélation, si besoin est, avec les images faciales et actions sur écran enregistrées afin de les infirmer ou confirmer.

C'est l'étude de ces facteurs et leurs combinaisons qui devraient nous indiquer l'état émotionnel dans lequel se trouve le sujet à chaque instant.

5. Matériel expérimental

- un PC utilisateur avec logiciels jeux et applications (CyberLink YouCam, CamStudio Recorder)
- un PC central avec un logiciel de capture des données liées aux capteurs physiologiques CAPTIV (connexions sans fil)
- les capteurs de la société TEA (GSR, T°, respiration, CFM)
- un physioscan fonctionnant sur le principe d'ondes électromagnétiques et disposant d'un logiciel dédié comprenant différents modules dont un pack émotionnel
- un casque neurosky fonctionnant à partir des ondes cérébrales avec lequel nous avons exécuté l'application Mindwave Mobile
- des enceintes
- des questionnaires et documents de droit et de sécurité
- un local pour l'expérimentation
- un minuteur
- un nécessaire de nettoyage des éléments utilisés par les différents utilisateurs
- des petits cadeaux pour participation



6. Dispositif expérimental ou d'échantillonnage

Quatre matériaux ont été créés :

- . un film d'une durée de 25 minutes contenant une succession d'images et d'extraits de films avec des temps calmes et des temps forts pour les stimulus
- . une expérience de concentration/méditation associée au casque neurosky fixée en temps à 10 minute par le biais d'une minuterie
- . un petit jeu vidéo court en temps et de type ambiance (scp)
- . un jeu plutôt de stratégie bornée à 20 minutes : le jeu de la molécule

Chaque matériau constitue le support de prise de données : physiologiques, images, réponses.

7. Variables mesurées

Une seule cible visée : toute personne à partir de 16 ans. Ceci correspond à notre variable indépendante.

Nos variables dépendantes sont les valeurs issues des capteurs et casque.

8. Mise en œuvre

Les expérimentations ont été réalisées sur trois semaines. Le calendrier s'est établi en fonction des disponibilités des personnes volontaires. Notre dispositif matériel étant en un seul exemplaire, il était possible de passer une seule personne à la fois toutes les heures environ.

23 personnes se sont présentées et ont participé aux expériences. Chacune d'entre-elles avait le choix entre une voire quatre expériences en fonction de ses disponibilités. Nous avons recueilli les données en continu de 67 expériences au total, d'une durée allant de 5 à 25 minutes chacune.

Les expériences se déroulaient dans une pièce dont les fenêtres étaient couvertes afin d'éviter les reflets sur l'écran du PC. Chaque personne était informée par écrit et oralement du déroulement des opérations, signait un document de présentation de l'expérimentation, de droit à l'image et d'information sur la santé et la sécurité. Elle pouvait interrompre l'expérience à tout moment.

Les capteurs étaient positionnés sur chaque sujet qui prenait place sur une chaise face à une table sur laquelle étaient posés un ordinateur et des enceintes d'où partaient les stimuli.

Après chaque expérience, un questionnaire était rempli au vu des réponses des sujets par le meneur ou une tierce personne.

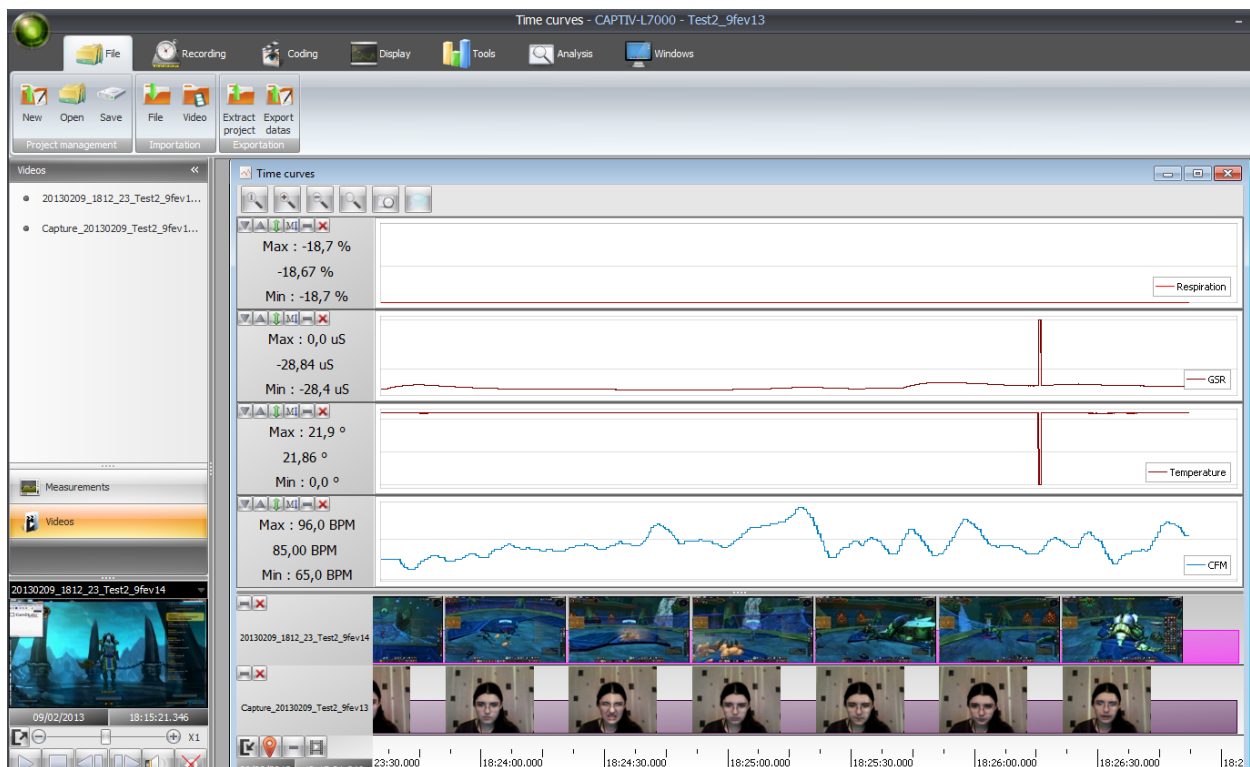
Ces questionnaires ont été établis avec des questions filtres, des questions à échelle d'évaluation (Likert), des questions ouvertes, des questions dichotomiques et des questions fermées. Ces types de questions sont utilisés en psychologie, en sociologie.

9. Traitement statistiques et analyses des données obtenues

Durant l'expérimentation, les données reçues en temps réel des capteurs pouvaient être surveillées. Si un capteur était défaillant, aucune action n'était entreprise afin de ne pas perturber le sujet et biaiser les résultats. Ces éléments seront pris en compte dans l'analyse.

Toutes les informations ont été enregistrées et classées dans des répertoires afin d'être analysées.

Les tableaux ci-dessous illustrent ces enregistrements.



Start time : 09/02/2013 18:15:21																							
Frequency : 32 Hz																							
Unit : %																							
Start time : 09/02/2013 18:15:21																							
Frequency : 32 Hz																							
Unit : uS																							
Start time : 09/02/2013 18:15:21																							
Frequency : 32 Hz																							
Unit : °																							
Start time : 09/02/2013 18:15:21																							
Frequency : 16 Hz																							
Unit : BPM																							
Respiration	GSR	Temperature	CFM	Respiration	GSR	Temperature	CFM	Respiration	GSR	Temperature	CFM	Respiration	GSR	Temperature	CFM	Respiration	GSR	Temperature	CFM	Respiration	GSR	Temperature	CFM
-18,67	-28,88	21,847	85	-18,67	-28,34	21,847	82	-18,67	-27,89	21,847	80	...	...	...	...	-18,67	-28,93	21,835	94	-18,67	-28,84	21,86	85
-18,67	-28,84	21,86	85	-18,67	-28,34	21,847	82	-18,67	-27,88	21,847	80	-18,67	-29,03	21,847	89	-18,67	-28,93	21,835	93	-18,67	-28,84	21,86	85
-18,67	-28,8	21,86	85	-18,67	-28,33	21,847	82	-18,67	-27,87	21,847	80	-18,67	-29,03	21,847	89	-18,67	-28,92	21,835	93	-18,67	-28,8	21,86	85
-18,67	-28,77	21,847	85	-18,67	-28,33	21,86	82	-18,67	-27,87	21,847	78	...	...	...	...	-18,67	-28,92	21,835	93	-18,67	-28,77	21,847	85
-18,67	-28,73	21,86	85	-18,67	-28,32	21,847	82	...	...	...	...	-18,67	-29,02	21,847	89	-18,67	-28,9	21,847	93	-18,67	-28,73	21,86	85
-18,67	-28,68	21,847	85	...	...	...	...	-18,67	-27,87	21,847	78	-18,67	-29,03	21,847	89	...	...	...	...	-18,67	-28,68	21,847	85
-18,67	-28,63	21,86	85	-18,67	-28,14	21,847	75	-18,67	-27,85	21,847	78	-18,67	-29,03	21,847	89	-18,67	-28,6	21,835	88	-18,67	-28,63	21,86	85
-18,67	-28,59	21,847	85	-18,67	-28,14	21,847	75	-18,67	-27,85	21,847	78	-18,67	-29,04	21,847	89	-18,67	-28,59	21,835	88	-18,67	-28,59	21,847	85
-18,67	-28,57	21,847	85	-18,67	-28,13	21,847	75	-18,67	-27,84	21,847	78	-18,67	-29,04	21,847	89	-18,67	-28,59	21,835	88	-18,67	-28,57	21,86	85
-18,67	-28,57	21,86	85	-18,67	-28,13	21,86	75	-18,67	-27,84	21,847	78	-18,67	-29,04	21,847	90	-18,67	-28,58	21,835	87	-18,67	-28,57	21,86	85
-18,67	-28,55	21,847	85	-18,67	-28,13	21,847	75	-18,67	-27,84	21,847	78	-18,67	-29,04	21,86	90	-18,67	-28,57	21,835	87	-18,67	-28,55	21,847	85
-18,67	-28,55	21,847	85	-18,67	-28,03	21,86	75	-18,67	-27,84	21,847	78	-18,67	-29,04	21,847	90	-18,67	-28,55	21,835	85	-18,67	-28,55	21,847	85
-18,67	-28,54	21,847	85	-18,67	-28,03	21,847	75	-18,67	-27,83	21,847	78	-18,67	-29,04	21,847	92	-18,67	-28,54	21,835	87	-18,67	-28,54	21,847	85
-18,67	-28,54	21,86	85	...	...	...	...	-18,67	-27,83	21,847	78	-18,67	-29,05	21,847	92	-18,67	-28,54	21,835	87	-18,67	-28,54	21,86	85
-18,67	-28,54	21,847	85	-18,67	-28,02	21,847	76	-18,67	-27,84	21,847	76	-18,67	-29,05	21,847	92	-18,67	-28,53	21,847	87	-18,67	-28,54	21,847	85
-18,67	-28,54	21,86	85	-18,67	-28,02	21,847	76	-18,67	-27,84	21,847	76	-18,67	-29,04	21,847	92	-18,67	-28,52	21,835	87	-18,67	-28,54	21,847	85
-18,67	-28,53	21,847	85	-18,67	-28,02	21,86	76	-18,67	-27,84	21,847	76	-18,67	-29,04	21,847	92	...	...	...	...	-18,67	-28,53	21,847	85
-18,67	-28,52	21,847	85	-18,67	-28,02	21,847	76	...	...	...	...	-18,67	-29,04	21,847	92	-18,67	-28,43	21,835	85	-18,67	-28,52	21,847	85
-18,67	-28,5	21,847	85	...	...	...	...	-18,67	-27,83	21,847	73	-18,67	-29,04	21,847	92	-18,67	-28,42	21,835	85	-18,67	-28,5	21,847	85
-18,67	-28,49	21,86	85	-18,67	-27,98	21,847	78	-18,67	-27,82	21,86	73	-18,67	-29,04	21,847	93	-18,67	-28,42	21,835	85	-18,67	-28,49	21,86	85
-18,67	-28,49	21,847	85	-18,67	-27,97	21,847	78	-18,67	-27,82	21,86	73	-18,67	-29,04	21,847	93	-18,67	-28,4	21,835	85	-18,67	-28,49	21,847	85
-18,67	-28,49	21,86	84	-18,67	-27,97	21,86	78	-18,67	-27,82	21,847	73	-18,67	-29,03	21,847	93	-18,67	-28,39	21,835	85	-18,67	-28,49	21,86	84
-18,67	-28,48	21,847	84	-18,67	-27,97	21,847	78	-18,67	-27,83	21,847	73	-18,67	-29,03	21,847	94	-18,67	-28,38	21,835	85	-18,67	-28,48	21,847	84
-18,67	-28,48	21,847	84	-18,67	-27,97	21,847	78	-18,67	-27,83	21,847	73	-18,67	-29,02	21,847	94	-18,67	-28,38	21,847	85	-18,67	-28,48	21,847	84
-18,67	-28,48	21,86	84	-18,67	-27,97	21,847	78	-18,67	-27,84	21,86	70	-18,67	-29,03	21,847	94	-18,67	-28,37	21,835	81	-18,67	-28,48	21,86	84
-18,67	-28,47	21,847	84	...	...	...	...	-18,67	-27,84	21,847	70	-18,67	-29,02	21,835	94	-18,67	-28,35	21,847	81	-18,67	-28,47	21,847	84
-18,67	-28,47	21,86	84	-18,67	-27,92	21,847	79	...	...	...	...	-18,67	-29,02	21,847	94	-18,67	-28,34	21,847	81	-18,67	-28,47	21,86	84
-18,67	-28,45	21,86	84	-18,67	-27,92	21,847	79	-18,67	-27,93	21,847	66	-18,67	-29,02	21,847	95	-18,67	-28,33	21,847	81	-18,67	-28,45	21,86	84
-18,67	-28,45	21,847	84	-18,67	-27,92	21,847	79	-18,67	-27,93	21,847	66	-18,67	-29,02	21,835	95	-18,67	-28,32	21,835	81	-18,67	-28,45	21,847	84
...	...	...	...	...	...	...	...	-18,67	-27,93	21,86	66	-18,67	-29,02	21,847	95	-18,67	-28,3	21,847	81	...	...	...	...
-18,67	-28,35	21,847	84	-18,67	-27,9	21,847	80	-18,67	-27,92	21,847	66	-18,67	-29,02	21,835	95	-18,67	-28,29	21,847	81	-18,67	-28,35	21,847	84
-18,67	-28,35	21,847	82	-18,67	-27,9	21,847	80	-18,67	-27,92	21,847	66	-18,67	-29	21,847	95	-18,67	-28,28	21,847	81	-18,67	-28,35	21,847	82
-18,67	-28,34	21,86	82	-18,67	-27,89	21,847	80	-18,67	-27,92	21,847	66	...	...	...	...	...	...	...	...	-18,67	-28,34	21,86	82

Les données qualitatives ne sont pour l'instant pas exploitées. Nous avons également recueilli des informations avant et après expériences à partir du pack émotionnel du physioscan. Ces données sont en cours d'extraction. Elles se présentent sous la forme suivante pour les « émotions – peurs » :

GC

AVANT

Emotions – peurs

Foie

0	0.000	FOIE, vue inférieure
0	2.441	DISTRIBUTION OPTIMALE
x	0	0.585
0	0.000	FOIE, vue inférieure
0	2.441	DISTRIBUTION OPTIMALE
x	0	0.585
1	0.656	STRESS FINANCIER
2	0.660	EPUISEMENT
1	0.663	PEURS DIFFUSES
0	0.684	BEAUCOUPS DE PEURS
0	0.692	PEUR DE LA MORT
0	0.692	PEUR POUR LES AUTRES
0	0.712	ECONOME
1	0.743	ETRE DANS LA DEFENSIVE
0	0.746	PEUR DE L'ECHEC

GC

APRES

Emotions – peurs

Foie

0	0.000	FOIE, vue inférieure
0	2.415	DISTRIBUTION OPTIMALE
x	0	0.543
0	0.000	FOIE, vue inférieure
0	2.415	DISTRIBUTION OPTIMALE
x	0	0.543
2	0.614	STRESS FINANCIER
2	0.626	PEURS DIFFUSES
3	0.630	EPUISEMENT
0	0.648	BEAUCOUPS DE PEURS
0	0.655	PEUR DE LA MORT
0	0.674	PEUR POUR LES AUTRES
0	0.675	ECONOME
2	0.710	ETRE DANS LA DEFENSIVE
0	0.713	SE MENACER, ETRE MENACE

Des questionnaires, comme celui ci-dessous, ont été remplis par un intervieweur après chaque expérience.

Questionnaire "Emotions - Jeu SPC 087"

Prénom ou pseudo :

Age :

Sexe :

Connaissez-vous déjà ce jeu ? ☐ oui ☐ non

Questions sur le dispositif expérimental si 1er test

Etiez-vous bien informé(e) ? ☐ oui ☐ non

Etiez-vous bien installé(e) ? ☐ oui ☐ non

L'éclairage vous semblait-il approprié ? ☐ oui ☐ non

La taille de l'écran était-elle satisfaisante ? ☐ oui ☐ non

En matière de son

le volume était ☐ bon ☐ trop fort ☐ trop faible

la qualité était ☐ bonne ☐ mauvaise

Les capteurs ont-ils perturbé votre concentration ? ☐ oui ☐ non

si oui

pouvez-vous énumérer les gênes occasionnées ?

Autres remarques sur le dispositif :

Questions sur l'expérience

Sur une échelle de 0 à 7 (0 = pas du tout et 7 = fortement) avez-vous senti ...

De la colère

De la peur

Du dégoût

De la joie

De la tristesse

De la surprise

Sur une échelle de 0 à 7 (0 = pas du tout et 7 = fortement) avez-vous senti ...

du stress

Quel a été le moment le plus intense ?

Quel a été le moment le moins intense ?

Avez-vous senti des moments d'apaisement ou de calme ? ☐ oui ☐ non

si oui

A quel(s) moment(s)

Quel moment avez-vous préféré ?

Quel moment avez-vous détesté ?

Avez-vous été victime d'un ascenseur émotionnel (variation d'état émotionnel brusque) ?

☐ oui ☐ non

si oui

A quel(s) moment(s) ?

Quel son vous a le plus marqué ? Pourquoi ?

Le son a-t-il eu un impact sur votre perception visuelle ?

Page 3 de 3

Tous ces éléments seront aussi analysés ultérieurement tout comme les données relatives aux « humeurs – états d'âme » et aux « pensées positivantes ».

10. Détermination du personnel nécessaire

Les personnes nécessaires à la mise en place de ces expérimentations sont :

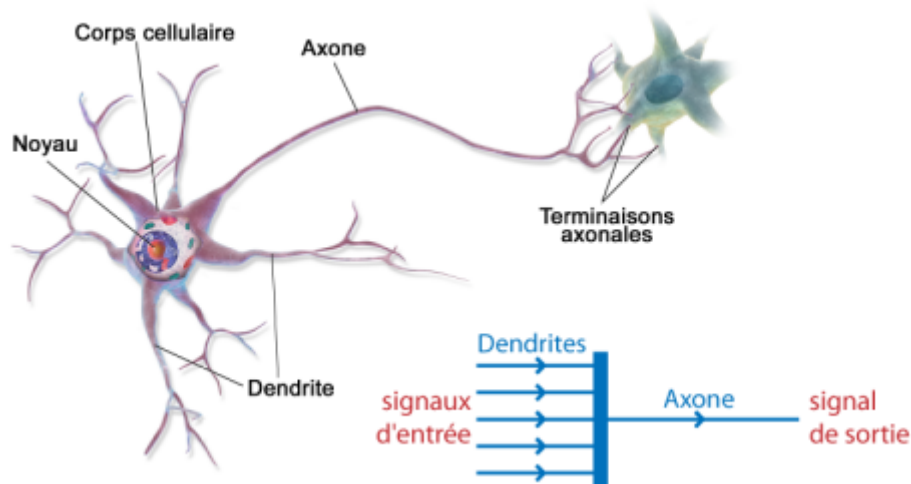
- . un gestionnaire du projet : une personne
- . une aide aux questionnaires : une personne
- . la participation éventuelle d'une personne du sexe opposé suivant les sujets pour l'installation des capteurs sur le torse.

Annexe 11 : neurone biologique (chapitre 4)

En biologie, il existe plus de deux cents sortes de cellules nerveuses soutenues par les cellules gliales ou glie qui les nourrissent, les protègent et jouent sans doute d'autres rôles en relation avec la transmission d'information. Les neurones de même type ont souvent la même fonction et une même localisation. Les classements se font sur leurs critères anatomiques.

Un neurone biologique présente les éléments suivants :

- Les dendrites modifient la quantité d'influx nerveux se dirigeant vers le noyau
- Le soma ou corps cellulaire participe aux réactions électrochimiques avec le noyau
- Le noyau contrôle les réactions électrochimiques
- L'axone transporte l'influx vers les synapses
- Les synapses transmettent l'influx nerveux de l'axone vers d'autres cellules grâce aux neurotransmetteurs
- Une taille
- Des critères fonctionnels :
 - Sensitifs ou afférents (circulation des informations des organes des sens vers le SNC)
 - Moteurs ou efférents (circulation des informations du SNC vers les effecteurs)



Structure d'un neurone biologique

<http://kezako.unisciel.fr/Kezako63/co/Kezako63.html> - consulté le 16 décembre 2017

Les neurones ne sont pas tous directement liés à un organe ou un muscle. Dans ce cas, ils sont appelés neurones d'association ou inter-neurones (entre neurones sensitifs et neurones moteurs). En bout d'axone, des boutons synaptiques terminent l'arborisation. Chacun de ces boutons peuvent être en contact avec une dendrite, un soma ou un autre axone. Il existe un espace à ce niveau qui constitue la fente synaptique.

Un neurone collecte des signaux de différentes sources, intègre ces signaux et distribue l'information par l'émission de signaux électrochimiques.

La zone de réception correspond à la partie des dendrites. Les messages reçus sont traités au niveau du soma que l'on nomme zone d'intégration et qui génère des signaux bioélectriques. La propagation de l'impulsion électrique se fait le long de l'axone qui est la zone de conduction. Et, enfin, la zone de transmission au niveau des terminaisons axoniques ou axonales, soit des boutons synaptiques, communique l'impulsion électrique à d'autres neurones. Quand le neurone biologique devient actif, un influx nerveux s'y propage, on parle de potentiel d'action. C'est l'excitation. Sinon, on parle de potentiel de repos ou d'inhibition.

« La stimulation en un point de la membrane d'un élément excitable, entraînant une dépolarisation membranaire suffisante (**valeur seuil**), provoque l'apparition d'un **potentiel d'action (PA)**. Ce PA est une **inversion brutale et transitoire du potentiel de membrane, qui obéit à la loi du tout ou rien et se propage sans atténuation**, de manière autonome, **tout au long de la membrane de l'élément excité** »¹⁶⁰.

« Ce potentiel d'action est un phénomène électrique qui présente deux caractéristiques fondamentales :

- A partir de la valeur seuil de dépolarisation, toute augmentation ultérieure de l'amplitude de la stimulation n'apporte aucun changement dans la réponse observée : **le PA obéit à la loi du tout ou rien**. Si le seuil de dépolarisation n'est pas atteint, il n'apparaît pas. Si le seuil est atteint, la réponse est maximale d'emblée.
- Emis en un point de l'axone, **il se propage sans atténuation tout au long de la fibre** »¹⁶¹.

¹⁶⁰ et ¹² <http://neurobranches.chez-alice.fr/neurophy/potact.html> - consultée le 21 janvier 2017

Annexe 12 : extrait programme R – carte Kohonen sur 8 expériences (chapitre 4)

Constitution de la carte

```
data_train5V_Num$Individu <- as.numeric(Huit_XP[,5])

# change la data frame avec les données d'entraînement en une matrice
# centre et met à l'échelle pour que toutes les données aient une importance égale
# dans le process d'entraînement de SOM
data_train_matrice <- as.matrix(scale(data_train))

data_train5V_matrice <- as.matrix(scale(data_train5V))

# crée la grille de la carte en précisant la taille et la topologie hexagonal ou circulaire
som_grid <- somgrid(xdim = 20, ydim = 20, topo = "hexagonal")

# entraînement de la carte SOM, options du nb d'itérations,
# taux d'apprentissage et le voisinage est disponible

system.time (som_model <- som(data_train_matrice,
                              grid = som_grid,
                              rlen = 100,alpha = c(0.5, 0.01),
                              keep.data = TRUE))

system.time (som_model <- som(data_train5V_matrice,
                              grid = som_grid,
                              rlen = 100,alpha = c(0.05, 0.01),
                              keep.data = TRUE))
```

Visualisation de différents graphes

```
#####  
##### visualisation  
#####  
  
# visualisation du processus d'entrainement  
plot(som_model, type = "changes")  
  
# visualisation des noeuds  
plot(som_model, type = "counts", main = "Node Counts")  
  
# carte qualité  
plot(som_model, type = "quality", main = "Node Quality/Distance")  
  
# visualisation de la distance entre chaque noeuds et ses voisins  
# les zones de faible distance de voisinage indiquent des groupes de noeuds similaires  
# Les zones avec de grandes distances indiquent que les noeuds sont beaucoup plus dissemblables  
plot(som_model, type = "dist.neighbours", main = "SOM neighbour distances")  
  
# visualisation du poids des vecteurs ou "codes" sont des valeurs normalisées  
# des variables d'origine utilisées pour générer la carte SOM  
# Le vecteur de pondération de chaque noeud est représentatif /  
# similaire des échantillons mappés à ce noeud  
plot(som_model, type = "codes")  
  
plot(som_model, type = "mapping", col = "darkgreen")  
plot(som_model$V1, type = "mapping", col = "darkgreen")  
  
## visualisation des graphes avec SOMbrero où "add" est équiv à "obs" ou "prototypes"  
plot(my.som, what = "add", type = "names", variable = data_train5V$Individu)  
plot(my.som, what = "add", type = "names",  
      variable = data_train5V$Individu,  
      scale = c(10.0, 15.0)  
)
```

Exemple de projection d'un individu sur la carte apprise

```
#####  
# #PCo2_N_XP  
setwd("F:/w Viviane en cours/Mon_R/Essai_SOM")  
PCo2_N_8XP <- read.csv2("PCo2_N_XP.csv")  
  
data_train_PCo2_N_8XP <- PCo2_N_8XP[, c(1,2,3,4)]  
data_train_PCo2_N_matrice_8XP <- as.matrix(scale(data_train_PCo2_N_8XP))  
  
# tentative de projection sur la carte apprise  
som_model$train.map <- apply(data_train_PCo2_N_matrice_8XP, 1, function(input1) {  
  apply(som_model$codes[[1]], 1, function(input2) dist(rbind(input1, input2)))  
})  
  
par(mfrow = c(1,1))  
for (a in 1:ncol(som_model$train.map)) {  
  plot(som_model,type='property', property = som_model$train.map[,a],  
       main= paste('PCo2_N_8XP', a)  
  )  
}  
  
projection13 <- predict(som_model,  
                       newdata = data_train_PCo2_N_matrice_8XP)  
  
som.prediction13 <- predict(som_model, newdata = data_train_PCo2_N_matrice_8XP, whatmap = 1)  
  
plot(som_model, type = "mapping", classif = projection13$unit.classif, col=colors(),  
     main="projection observations PCo2_N_8XP")  
  
#nombre occurrences dans chaque noeud (ici 400 noeuds)  
nb_occ13 <- table(factor(projection13$unit.classif, levels= 1:400 ))  
sink("F:/w Viviane en cours/Mon_R/Essai_SOM/nb_occ_PCo2_N_8XP.txt")  
print(nb_occ13)  
sink()
```


Annexe 13 : extrait programme Python – Mélange Gaussien, SVR (chapitre 4)

Mélange Gaussien pour EMDeep

```
#!/usr/bin/env python3
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Mon June 26 16:32:02 2019

@author: Viviane
"""
|
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from sklearn.mixture import GaussianMixture
from matplotlib.patches import Ellipse
import seaborn as sns
import matplotlib as mpl
sns.set(style="white", color_codes=True)
import warnings
warnings.filterwarnings("ignore")

#####
def plotData(df, groupby):
    "make a scatterplot of the first two principal components of the data, colored by the groupby field"

    # make a figure with just one subplot.
    # you can specify multiple subplots in a figure,
    # in which case ax would be an array of axes,
    # but in this case it'll just be a single axis object.
    fig, ax = plt.subplots(figsize = (7,7))
    nclusters=3
    # color map
    cmap = mpl.cm.get_cmap('prism')

    # we can use pandas to plot each cluster on the same graph.
    # see http://pandas.pydata.org/pandas-docs/stable/generated/pandas.DataFrame.plot.html
    for i, cluster in df.groupby(groupby):
        cluster.plot(ax = ax, # need to pass this so all scatterplots are on same graph
                     kind = 'scatter',
                     x = 'PC1', y = 'PC2',
                     color = cmap(i/(nclusters-1)), # cmap maps a number to a color
                     label = "%s %i" % (groupby, i),
                     s=30) # dot size

    ax.grid()
    ax.axhline(0, color='black')
    ax.axvline(0, color='black')
    ax.set_title("Principal Components Analysis (PCA) of physiological_data ");
```

```

def main():
    #my_file = pd.read_csv('./combined_acc.csv',header=None)
    data = pd.read_csv('./reduced_Acc_txt.csv')
    X = data
    y = pd.read_csv('reduced_data_clusters.csv')
    print(y)
    #print(X.sample(5))
    #print(y.sample(5))
    #sns.FacetGrid(data, hue="Intensity_emotion", size=4).map(plt.scatter, "Latitude", "emotion_cluster_x").:
    #sns.swarmplot(x="Emotion_instanceand class", y="Latitude", data=data)
    #sns.pairplot(data, hue="Emotion_instances ", diag_kind="hist", size=1.6)
    ...
    from sklearn import preprocessing

    scaler = preprocessing.StandardScaler()

    scaler.fit(X)
    X_scaled_array = scaler.transform(X)
    X_scaled = pd.DataFrame(X_scaled_array, columns = X.columns)

    print(X_scaled.sample(5))
    ...
    X_scaled=X
    plt.grid()
    print("hello")
    nclusters=3
    gmm = GaussianMixture(n_components=nclusters)
    gmm.fit(X_scaled)

    gmm = GaussianMixture(n_components=nclusters)
    gmm.fit(X_scaled)
    # predict the cluster for each data point
    y_cluster_gmm = gmm.predict(X_scaled)
    #print(y_cluster_gmm)
    from sklearn.decomposition import PCA

    ndimensions = 2
    print(gmm.covariances_)

```

```

print(X_scaled.shape)
pca = PCA(n_components=ndimensions, random_state=0)
pca.fit(X_scaled)
X_pca_array = pca.transform(X_scaled)

plt.figure(figsize=(15, 12))
plt.plot(X_pca_array[:,0], X_pca_array[:,1], 'g^')
X_pca = pd.DataFrame(X_pca_array, columns=['PC1', 'PC2']) # PC=principal component
print(X_pca.sample(5))
df_plot = X_pca.copy()
print(df_plot.shape)
y_id_array = pd.Categorical(y["# emotion class"]).codes

print("!!!!!!")
print(y_id_array)
print(y_cluster_gmm)
df_plot['SpeciesId'] = y_id_array
df_plot['ClusterGMM'] = y_cluster_gmm
print(df_plot.head(10))

plotData(df_plot, 'ClusterGMM')

|

from sklearn.metrics import accuracy_score
y_cluster_gmm = np.where(y_cluster_gmm ==1, 0, y_cluster_gmm)
y_id_array = np.where(y_id_array ==1, 0, y_id_array)

# first let's see how the k-means clustering did -
score = accuracy_score(y_id_array, y_cluster_gmm)
print(score)
np.savetxt("mu.txt", np.array(gmm.means_))
np.savetxt('mu.csv', np.array(gmm.means_), delimiter=",", header="A,B,C")

if __name__ == '__main__':
    main()

```

```

from GMM_nDim3 import read_data
import numpy as np
from sklearn.manifold import TSNE
import matplotlib.pyplot as plt
from sklearn import svm
from sklearn.svm import SVC
from sklearn.multiclass import OneVsRestClassifier
from sklearn.metrics import roc_curve, auc
from sklearn.preprocessing import label_binarize
from scipy import interp
from itertools import cycle
from sklearn.metrics import confusion_matrix

labels = ['Iris-setosa', 'Iris-versicolor', 'Iris-virginica']/* Standard Irish data */
X = np.loadtxt("mu.txt")
file_name = "iris.data"
data, ref_clusters = read_data(file_name)
y_test = label_binarize(ref_clusters, classes=[0, 1, 2])
n_classes = y_test.shape[1]
y = np.array([0, 1, 2])
clf = svm.SVC(C=1.0, kernel='rbf', tol = 0.001, decision_function_shape = 'ovr', gamma='auto')
clf.fit(X, y)
print(data)
y_score = clf.decision_function(data)
print(y_score)
prediction = []
for i in range(150):
    print(clf.predict([list(data[i])]), end=" ")
    prediction.append(int(clf.predict([list(data[i])])))

#Accuracy
favour=0
total=0
for i in range(len(ref_clusters)):
    total+=1
    if(ref_clusters[i]==prediction[i]):
        favour+=1
print()
print("Accuracy by sklearn is : " + str(clf.score(data,ref_clusters)*100))
print("Favourable are " + str(favour) + " Total are "+ str(total) )
acc = (float)(favour/total) * 100
print("Accuracy is " + str(acc) +"%")

```

```

# title for the plots
titles = ['Hybrid GMM-SVC with linear kernel',
          'Hybrid GMM-LinearSVC (linear kernel)',
          'Hybrid GMM-SVC with RBF kernel',
          'Hybrid GMM-SVC with polynomial (degree 3) kernel']

i=0
for i, clf in enumerate((svc, lin_svc, rbf_svc, poly_svc)):
    # Plot the decision boundary. For that, we will assign a color to each
    # point in the mesh [x_min, x_max]x[y_min, y_max].
    plt.figure(figsize=(20,10))
    plt.subplot(2, 2, i + 1)

    plt.subplots_adjust(wspace=0.4, hspace=0.4)

    Z = clf.predict(np.c_[xx.ravel(), yy.ravel()])

    # Put the result into a color plot
    Z = Z.reshape(xx.shape)
    plt.contourf(xx, yy, Z, cmap=plt.cm.summer, alpha=0.8)

    # Plot also the training points
    plt.scatter(X[:, 0], X[:, 1], c=y, cmap=plt.cm.seismic)
    #plt.xlabel('Sepal length')
    #plt.ylabel('Sepal width')
    plt.xlim(xx.min(), xx.max())
    plt.ylim(yy.min(), yy.max())
    plt.xticks(())
    plt.yticks(())
    plt.title(titles[i])

plt.show()

#Accuracy
favour=0
total=0
for i in range(len(ref_clusters)):
    total+=1
    if(ref_clusters[i]==prediction[i]):
        favour+=1

print()
print("Accuracy by sklearn is : " + str(clf.score(data,ref_clusters)*100))
print("Favourable are " + str(favour) + " Total are " + str(total) )
acc = (float)(favour/total) * 100
print("Accuracy is " + str(acc) +"%")

#LinearSVC minimizes the squared hinge loss while SVC minimizes the regular hinge loss.
#LinearSVC uses the One-vs-All (also known as One-vs-Rest) multiclass reduction while SVC uses the One-vs-

data = np.concatenate((data,X),axis = 0)

X_embedded = TSNE(n_components=2).fit_transform(np.array(data))
X = X_embedded[0:150,:]

y = ref_clusters
train_X = X_embedded[150:153,:]
train_y = np.array([0, 1, 2])
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
scaler = StandardScaler()
print(scaler.fit(X))
print(scaler.mean_)
X = scaler.transform(X)
#h = .02

C = 1.0 # SVM regularization parameter
#Trained on means
svc = svm.SVC(kernel='linear', C=C).fit(train_X, train_y)
rbf_svc = svm.SVC(kernel='rbf', gamma=0.7, C=C).fit(train_X, train_y)
poly_svc = svm.SVC(kernel='poly', degree=3, C=C).fit(train_X, train_y)
lin_svc = svm.LinearSVC(C=C).fit(train_X, train_y)

# create a mesh to plot in
x_min, x_max = X[:, 0].min() - 1, X[:, 0].max() + 1
y_min, y_max = X[:, 1].min() - 1, X[:, 1].max() + 1
xx, yy = np.meshgrid(np.arange(x_min, x_max, h), np.arange(y_min, y_max, h))

```


Viviane GAL

Vers une nouvelle Interaction Homme Environnement dans les jeux vidéo et pervasifs : rétroaction biologique et états émotionnels

Apprentissage profond non supervisé au service de l'affectique

Résumé

Vivre des moments exceptionnels, connaître des sensations fortes, du bien-être, nous épanouir, font souvent partie de nos rêves ou aspirations. Nous choisissons des moyens divers pour y arriver comme le jeu. Que le joueur recherche l'originalité, les défis, la découverte, une histoire, ou d'autres buts, ce sont des états émotionnels qui sont l'objet de sa quête. Il attend que le jeu lui procure du plaisir, des sensations. Comment les lui apporter ? Mettre au point une nouvelle interaction humain environnement, dans les jeux vidéo ou pervasifs ou autres applications, prenant en compte et s'adaptant aux émotions de chacun, sans être gêné par les interfaces, biocapteurs de contact par exemple, est notre objectif. Cela soulève deux questions :

- Peut-on découvrir des états émotionnels à partir de mesures physiologiques issues de biocapteurs de contact ?
- Si oui, ces capteurs peuvent-ils être remplacés par des dispositifs distants, donc non invasifs, et produire les mêmes résultats ?

Les modèles mis au point proposent des solutions à base de méthodes mathématiques d'apprentissage non supervisées. Nous présentons aussi des moyens de mesures à distance et expliquons les futurs travaux dans le domaine que nous baptisons affectique.

Mots-clés : Etats émotionnels, affectique, interaction humain environnement, apprentissage non supervisé, capteurs physiologiques, jeux vidéo et pervasifs, cartes de Kohonen, EMDeep, réseau sans fil, intelligence ambiante

Abstract

Living exceptional moments, experiencing thrills, well-being, blooming, are often part of our dreams or aspirations. We choose various ways to get there like games. Whether the player is looking for originality, challenges, discovery, a story, or other goals, emotional states are the purpose of his quest. He remains until the game gives him pleasure, sensations. How bring them there? We are developing a new human environment interaction that takes into account and adapts to emotions. We address video or pervasive games or other applications. Through this goal, players should not be bothered by interfaces, or biosensors invasiveness. This work raises two questions:

- Can we discover emotional states based on physiological measurements from contact biosensors?
- If so, can these sensors be replaced by remote, non-invasive devices and produce the same results?

The models we have developed propose solutions based on unsupervised machine learning methods. We also present remote measurements techniques and explain our future works in a new field we call affectics.

Keywords: Emotional states, affectics, human environment interaction, unsupervised learning, physiological sensors, video and pervasive games, Kohonen maps, EMDeep, wireless network, ambient intelligence