

L'IMAGERIE CÉRÉBRALE ET LA CONCEPTION DE PRODUIT : VERS DE NOUVEAUX OUTILS D'ÉVALUATION

Jessy Barré, Amandine Afonso-Jaco, Stéphanie Buisine, Améziane Aoussat

Presses Universitaires de France | « [Le travail humain](#) »

2015/3 Vol. 78 | pages 217 à 238

ISSN 0041-1868

ISBN 9782130651567

Article disponible en ligne à l'adresse :

<http://www.cairn.info/revue-le-travail-humain-2015-3-page-217.htm>

!Pour citer cet article :

Jessy Barré *et al.*, « L'imagerie cérébrale et la conception de produit : vers de nouveaux outils d'évaluation », *Le travail humain* 2015/3 (Vol. 78), p. 217-238.

DOI 10.3917/th.783.0217

Distribution électronique Cairn.info pour Presses Universitaires de France.

© Presses Universitaires de France. Tous droits réservés pour tous pays.

La reproduction ou représentation de cet article, notamment par photocopie, n'est autorisée que dans les limites des conditions générales d'utilisation du site ou, le cas échéant, des conditions générales de la licence souscrite par votre établissement. Toute autre reproduction ou représentation, en tout ou partie, sous quelque forme et de quelque manière que ce soit, est interdite sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, en dehors des cas prévus par la législation en vigueur en France. Il est précisé que son stockage dans une base de données est également interdit.

SYNTHÈSE
SYNTHESIS

L'IMAGERIE CÉRÉBRALE
ET LA CONCEPTION DE PRODUIT :
VERS DE NOUVEAUX OUTILS D'ÉVALUATION

par JESSY BARRÉ^{*1}, AMANDINE AFONSO-JACO^{*1,2},
STÉPHANIE BUISINE ^{*1,3} ET AMÉZIANE AOUSSAT^{*1}

SUMMARY

BRAIN IMAGING AND PRODUCT DESIGN: TOWARDS NEW EVALUATION METHODS

This paper presents a literature review about the use of brain imaging for non-medical applications. Indeed, new scientific fields have been appearing for a few years around brain activity and have been developed using brain imaging: neuro-ergonomics, neuromarketing and neuroaesthetics. The literature distinguishes two fields of research:

– The replacement of motor and cognitive functions: In this first category of research, humans are assisted by technology (computing and mechanics), which substitutes motor and/or cognitive actions with cerebral responses in order to compensate the effects of sensory or motor disorders. Brain imaging is therefore used to modify and improve human activity.

– The construction of new knowledge about human beings: This second category concerns the interpretation of brain imaging in order to understand human beings (i.e. mental or social processes) without disturbing the subject's activity (driving, shopping, working...).

Our objective is to present a review of this research but also to set a prospective framework for using brain imaging in product design in order to overcome the limits of existing methods and improve the evaluation of products or concepts with more objective results. For example, EEG equipment could be used to measure the performance, the learning curve and the satisfaction of users interacting with a product.

Keywords: *Ergonomics, Neuroscience, Neuroergonomics, Evaluation methods, Usability, Brain imaging, EEG.*

1. Arts et Métiers ParisTech, LCPI, 151 boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris. Courriel : jessy.barre@gmail.com

2. Université Paris Descartes, Institut de Psychologie, LMC, 71 avenue Edouard Vaillant, 92774 Boulogne Billancourt.

3. EL.CESI, IRISE, 93 boulevard de la Seine, 92000 Nanterre.

I. INTRODUCTION

L'utilisabilité est 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 » (norme ISO 9241). Pour atteindre un degré d'utilisabilité satisfaisant, la démarche de conception "centrée-utilisateur" permet de prendre en compte les besoins des utilisateurs tout au long du processus de développement d'un produit ou d'une interface. Une des étapes importantes consiste en l'évaluation des produits par les utilisateurs, pour savoir s'ils répondent à leurs besoins et attentes (Dix, Finlay, Abowd, & Beale, 1993 ; Brangier & Barcenilla, 2003 ; Baccino, Bellino & Colombi, 2004). La majorité des outils utilisés actuellement produisent des données observationnelles (analyse des contextes d'usage, analyse des résultats et des traces de l'activité, analyse comportementale...) et discursives (entretiens, questionnaires, verbalisations...) qui peuvent être soumises à une part de subjectivité importante. Depuis plusieurs années maintenant, les techniques d'imagerie cérébrale sont utilisées en recherche, comme par exemple en marketing, afin d'obtenir des données plus objectives sur l'humain, et notamment sur ses mécanismes perceptifs, ses réactions et prises de décision lors de l'interaction avec un produit.

Nous exposons dans cet article une revue de question concernant l'utilisation de l'imagerie cérébrale en conception de produit. Notre objectif est de savoir si l'analyse de l'activité cérébrale d'un utilisateur en situation d'interaction avec un produit (outil à main, ustensile de cuisine, smartphone, GPS...) pourrait fournir des informations sur l'efficacité (ex : perception, compréhension), l'efficience (ex : charge mentale, temps d'apprentissage) et la satisfaction de l'utilisateur (ex : difficulté, préférence, confort). Les méthodes d'imagerie cérébrale pourraient alors devenir des outils pour analyser les processus cognitifs en situation d'interaction afin d'enrichir le processus de conception et d'aboutir à des produits plus utilisables.

Nous allons dans un premier temps introduire les principales techniques d'imagerie cérébrale existantes, puis présenter leur utilisation hors du champ du diagnostic médical. Nous avons identifié dans la littérature deux champs de recherches qui sont explorés à partir des données issues de l'imagerie cérébrale. Le premier concerne les interfaces cerveau-machine (*Brain Computer Interface*) et sur la cognition augmentée (*Augmented Cognition*). Il porte sur la substitution des fonctions motrices et cognitives : l'imagerie cérébrale est utilisée comme un outil pour soutenir et améliorer l'activité humaine, et pour rendre l'utilisateur plus performant. Dans le second champ de recherches qui regroupe la *neuroergonomie*, le *neuro-marketing* et le *neuroesthétisme*, l'imagerie cérébrale est utilisée pour étudier l'humain en activité, mais sans interférer avec celle-ci. L'objectif est de recueillir des données les plus objectives possibles pour mieux comprendre l'activité humaine. Nous nous appuierons sur ces deux champs pour proposer une visée prospective concernant la neuroergonomie de conception ou "neuro-utilisabilité".

II. LES MÉTHODES D'IMAGERIE CÉRÉBRALE

Lorsqu'un individu effectue une activité sensorimotrice ou cognitive, les mécanismes cérébraux sous-tendant ces activités ont des besoins métaboliques importants. Cette demande énergétique est comblée principalement par la consommation de glucose. Comme le cerveau ne dispose que de peu de réserves, il est donc dépendant de l'apport de glucose et d'oxygène. Dès lors, les variations régionales des taux de glucose ou d'oxygène correspondent assez précisément aux besoins métaboliques requis. Ainsi, les mesures du débit sanguin régional ou de la consommation cérébrale d'oxygène et de glucose permettent d'obtenir une estimation de l'activité métabolique liée à l'activité synaptique sous-tendant des tâches sensorimotrices ou cognitives (Afonso, 2006).

Plus précisément, le système nerveux est constitué de plusieurs milliards de cellules qui sont divisibles principalement en deux catégories : les neurones et les cellules gliales. Les neurones sont les principaux éléments qui permettent, grâce à des signaux électriques, la communication au sein du système nerveux, qu'il soit central ou périphérique. Leurs corps cellulaires forment ce que l'on nomme la « substance grise » cérébrale (ou cortex), et sont en moyenne chacun connectés à 10 000 autres neurones. Grâce à leur prolongement (axone et ses différentes ramifications), ils envoient à leur tour un signal électrique également à 10 000 autres neurones environ. Les cellules gliales sont principalement des cellules de soutien, remplissant l'espace non occupé par les neurones et faisant l'intermédiaire entre ces derniers et la circulation sanguine. Elles permettent d'améliorer la vitesse de conduction de l'information entre les neurones, grâce à la génération de la gaine de myéline (entourant les axones) qui forme la « substance blanche ». De récentes études montrent que les cellules gliales, notamment les astrocytes, pourraient avoir un rôle de communication et libérer des gliotransmetteurs (Pfrieger & Reber, 2013).

Le fonctionnement du cerveau humain met donc en jeu directement les neurones (activité électrique), mais aussi les cellules gliales et le système circulatoire pour l'apport d'oxygène et de glucose. L'observation de ce fonctionnement est possible grâce aux différentes techniques d'imagerie cérébrale qu'il s'agisse de la localisation des zones activées ou bien de l'analyse des différentes ondes électromagnétiques, reflet de l'activité électrique des neurones (Houdé, Mazoyer & Tzourio-Mazoyer, 2002 ; Fiori, 2006). Nous pouvons distinguer deux grandes familles de méthodes d'imagerie cérébrale : *les méthodes directes* avec la mesure de l'activité électromagnétique des neurones et *les méthodes indirectes* avec la mesure des changements métaboliques et hémodynamiques. La figure 1 caractérise ces différentes méthodes.

Parmi les méthodes d'observation directe de l'activité cérébrale, nous pouvons citer l'Électroencéphalographie (EEG) et la Magnétoencéphalographie (MEG). Ces méthodes enregistrent directement le signal (électrique pour l'EEG ou magnétique pour la MEG) d'une population de neurones actifs à travers le scalp d'un individu. Ces techniques jouissent d'une excellente résolution temporelle (de l'ordre de la milliseconde), mais

d'une faible résolution spatiale (de l'ordre du centimètre). Par ailleurs, elles ont l'avantage de ne pas être invasives pour l'individu.

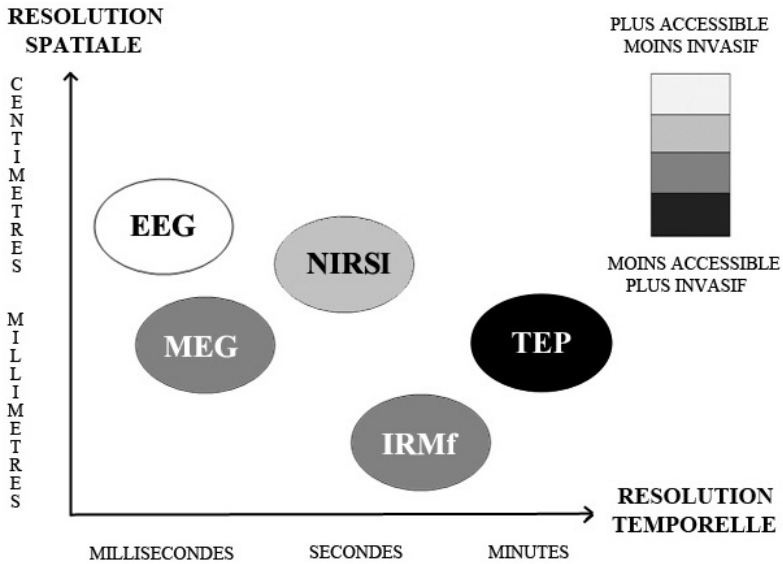


Figure 1 : Résolution spatiale et temporelle des techniques d'imagerie cérébrale
(Schéma adapté de Laureys, Peigneux & Goldman, 2002 ; Parasuraman & Rizzo, 2007).

Figure 1: Spatial and temporal resolutions of brain imaging techniques.






Les méthodes d'observation indirecte sont principalement l'Imagerie fonctionnelle par Résonance Magnétique (IRMf), la Tomographie par Émission de Positons (TEP) et également l'Imagerie Spectroscopique Proche Infrarouge (ISPIf ou NIRSI en anglais). L'activité hémodynamique et métabolique est enregistrée à l'aide de traceurs para magnétiques (IRMf) ou radioactifs (TEP). Ces méthodes permettent d'obtenir une excellente résolution spatiale (de l'ordre du millimètre). En revanche, les données obtenues n'étant pas le reflet direct de l'activité synaptique, mais de la mesure de leurs conséquences vasculaires et métaboliques, ceci engendre une faible résolution temporelle (de l'ordre de 1 à 3 sec). Seule la méthode NIRSI permet d'avoir une résolution spatiale et temporelle intermédiaire (figure 1).

Comme le souligne Joliot (2002), les techniques d'imagerie sont plus complémentaires que concurrentes. Mais chaque technique possède ses points forts et ses points faibles que nous synthétisons dans le tableau 1, à partir des données de la littérature (Laureys, Peigneux & Goldman, 2002 ; Houdé, Mazoyer & Tzourio-Mazoyer, 2002 ; Parasuraman & Rizzo, 2007 ; Tsunashima, Yanagisawa, & Iwadate, 2012). Au regard des contraintes liées à chacune de ces techniques, le recours à l'une ou l'autre sera fonction de ce qu'il sera le plus souhaitable de préserver au sein des travaux de recherche comme l'acquisition d'informations spatiales et/ou temporelles.

Des contraintes organisationnelles et environnementales telles que l'achat du matériel, son installation et son utilisation permettent également de sélectionner la technique la plus adéquate.

TABLEAU 1 : Synthèse des avantages et inconvénients pour chaque technique d'imagerie cérébrale.

TABLE 1: Summary of advantages and disadvantages for each technique of Brain Imaging.

		EEG	NIRSI	MEG	IRMf	TEP
Résolution	Temporelle	++ 1 ms	+ > 10 ms	+ 1 ms	- 1 à 6 sec	-- 90 sec
	Spatiale	-- ≥ 1 cm	- ≥ 1 cm	+ ≥ 1 cm	++ 3 mm	+ 5 mm
Contraintes de mesure	Immobilisation de la personne	- Peu stricte	- Peu stricte	+ Stricte	++ Très stricte	++ Stricte
	Caractère invasif	--	--	- Immobilité	++ Tunnel + bruit	++ Injection
	Séquence d'acquisition	De 10 à 100 essais + moyennage	25 essais + moyennage	De 10 à 100 essais + moyennage	Variable	2 à 3 fois minimum (12 maximum)
Acquisition/installation	Prix	- 2 000 à 50 000 €	- 2 000 à 50 000 €	++ > 500 000 €	++ > 500 000 €	++ > 500 000 €
	Encombrement	-- 	-- 	+ 	++ 	++ 

Les appareillages EEG et NIRSI, sont de loin les moins encombrants par rapport aux autres techniques. Les récentes améliorations notamment sur l'EEG permettent de s'affranchir du gel crânien, l'appareillage est devenu minimaliste et léger en laissant une liberté d'action pour l'individu grâce aux technologies sans fil. Il existe actuellement de nombreux appareillages EEG, plus ou moins encombrant et plus ou moins précis (de 1 à 256 électrodes en fonction du type d'appareil et du type de recherche). Les casques EEG utilisés dans les recherches présentées dans la suite de l'article possèdent entre 3 et 20 électrodes en moyenne et sont économiquement accessibles (entre 2 000 et 50 000 euros en fonction du modèle).

L'amélioration de ces techniques est stimulée par la popularité actuelle des recherches sur la substitution des fonctions cognitives et motrices des individus. Nous présentons ce champ de recherches dans la section suivante.

III. L'IMAGERIE CÉRÉBRALE POUR LA SUBSTITUTION DES FONCTIONS COGNITIVES ET MOTRICES

Dans ce champ de recherche, l'humain est assisté par la technologie informatique et mécanique. L'objectif est que ces technologies puissent se substituer à certaines actions motrices et/ou cognitives afin de compenser un trouble moteur ou sensoriel.

III.1. BRAIN COMPUTER INTERFACE NON INVASIF¹

Les données obtenues par les techniques d'imagerie présentées ci-dessus peuvent permettre de communiquer avec un dispositif externe : ce sont les interfaces neuronales directes (*Brain Computer Interface* ou BCI). Plus besoin d'action motrice pour agir sur un dispositif ou un objet, tout est réalisable « par la pensée ». Les articles et les ouvrages sur ce sujet sont de plus en plus nombreux (Graumann, Allison & Pfurtscheller, 2010 ; Wolpaw & Wolpaw, 2012).

L'EEG est la technique la plus courante. L'activité cérébrale recueillie par les électrodes permet d'interagir directement avec des dispositifs tels que des logiciels et des jeux vidéo (Krepki, Blankertz, Curio & Müller, 2007) ou tout autre système technique comme le contrôle d'un fauteuil roulant (Tanaka, Matsunaga & Wang, 2005). Le signal enregistré par le casque EEG représente les ondes électriques cérébrales correspondant à une activité bioélectrique spontanée (sans stimulation). Ces ondes peuvent être classées en fonction de leur fréquence (Hz) et de leur amplitude (μV) : c'est ce que l'on appelle les rythmes cérébraux (Delta, Thêta, Alpha...). Les potentiels évoqués sont des ondes cérébrales correspondant à une activité bioélectrique liée à des stimulations externes (un son, une image) ou internes (activité cognitive ou motrice). Parmi les principaux potentiels évoqués, nous pouvons citer l'onde P300 ou l'onde N170.

Les dispositifs BCI enregistrent et traitent les ondes de l'activité spontanée ou évoquée puis les convertissent en signaux de contrôle pour créer une interaction avec l'utilisateur. Chaque type de réponse cérébrale aura alors été préalablement dévolu à une action particulière sur le dispositif. Les casques EEG sont devenus populaires et sont maintenant accessibles au grand public. Des sociétés comme *NeuroSky* ou *Emotiv* commercialisent ces systèmes EEG ainsi que des applications (figure 2). Ce sont des casques d'une grande simplicité d'utilisation : on les place sur la tête et on interagit avec l'application après un bref calibrage (Sourina, Liu, Wang & Nguyen, 2011). Certains auteurs s'intéressent également à la charge mentale liée à l'usage des dispositifs BCI (Felton, Williams, Vanderheiden, & Radwin, 2012), afin notamment d'améliorer la conception de ce genre d'interface.

1. Les dispositifs de BCI invasifs ont des objectifs thérapeutiques comme le remplacement de fonctions cognitives et motrices. Les capteurs sont alors introduits chirurgicalement sur les patients et dépassent le cadre de la neuro-imagerie comme nous la traitons ici.



Figure 2 : Application BCI avec le jeu « The Mindy Ant » et le casque EEG Mindwave développés par la société Neurosky. Le personnage avance si le niveau de concentration, obtenu par le capteur EEG à partir de l'onde Beta, est suffisant.

Figure 2: BCI application with «The Mindy Ant» game and Mindwave EEG headset of Neurosky corporation.
The character moves ahead if the concentration level is reasonable (obtained by the Beta wave from the EEG sensor).

III.2. LA COGNITION AUGMENTÉE

La cognition augmentée a pour objectif d'améliorer les fonctions cognitives humaines grâce aux technologies informatiques. Les capacités cognitives de l'humain étant limitées (mémoire, attention, compréhension...), certaines recherches portent sur la conception de technologies permettant de soutenir, voire de remplacer l'activité cognitive humaine. Les informations obtenues grâce à l'imagerie cérébrale permettent de mesurer en temps réel l'état mental du participant – par ex., fatigue ou surcharge mentale, et d'agir lorsque cela est nécessaire.

Dans une étude de Dixon et al. (2009), l'activité cérébrale de l'équipage d'un véhicule militaire était mesurée pour identifier la surcharge mentale lors de tâches réalisées simultanément (conduite, communication...). Les communications gérées par le pilote pouvaient alors être transférées au coéquipier ou différées si une demande cognitive élevée était détectée par le dispositif EEG. Ce système de cognition augmentée contrôlait, soutenait et améliorait alors les performances des individus.

D'autres études visent à concevoir de nouveaux outils ou matériels destinés à l'opérateur en situation de travail, comme des détecteurs de fatigue pour les conducteurs (Sullivan, 2003) ou les pilotes (Cabon, Bourgeois-Bougrine, Mollard, Coblentz & Speyer, 2003). À partir de paramètres physiologiques enregistrés par électroencéphalographie, électrocardiographie ou encore électro-oculographie, il est alors possible de déterminer le moment où une personne est en train de s'endormir, ce qui offre la possibilité de la réveiller, avec par exemple, une alarme sonore. Ce type

de mesure en situation nécessite un temps de préparation assez important (préparation du matériel, algorithmes de traitement...), mais donne des résultats intéressants car agit en temps réel, ce qui est pertinent pour l'activité de conduite ou de pilotage.

IV. L'APPORT DE NOUVELLES CONNAISSANCES SUR L'HUMAIN

Dans ce second champ de recherches, il ne s'agit plus d'utiliser les réponses cérébrales comme moyen d'action, mais d'interpréter les données issues de l'imagerie sans perturber l'activité. Les réponses cérébrales sont étudiées pour comprendre le fonctionnement mental ou social des individus.

IV.1. LA NEUROERGONOMIE

L'ergonomie des situations de travail s'est intéressée à la chronobiologie (étude des rythmes biologiques) notamment pour les travailleurs postés et les activités nécessitant vigilance et attention (Barthe, Quéinnec & Verdier, 2004). L'électroencéphalographie était alors le premier outil utilisé pour rendre compte de la fatigue en fonction des rythmes veille/sommeil avec les travaux d'Åkerstedt dans les années quatre-vingt. Un nouveau courant en ergonomie a fait son apparition, il y a un peu plus d'une dizaine d'années : la neuroergonomie (Sarter & Sarter, 2003 ; Parasuraman & Rizzo, 2007 ; Parasuraman et al., 2012). Cette discipline explore les fonctions cérébrales activées lorsque l'homme se trouve en situation de travail, en utilisant notamment les techniques d'imagerie cérébrale pour répondre aux problématiques telles que la santé, la sécurité et l'efficacité. L'aviation et l'automobile sont les deux secteurs les plus explorés, principalement dans un objectif de sécurité : la prise de décision des pilotes d'avion lors d'un atterrissage risqué (Causse, 2010 ; Causse et al., 2013), les effets des psychotropes (cannabis et alcool) sur la conduite automobile (Calhoun, McGinty, Pekar, Watson & Pearlson, 2001 ; Calhoun, Pekar & Pearlson, 2004). Dans ces expérimentations, les auteurs comparent les activations cérébrales (similarités et différences) entre différentes conditions expérimentales. Les résultats sont ensuite confrontés, d'une part à la littérature scientifique du point de vue anatomo-fonctionnel des aires cérébrales, et d'autre part aux données issues de l'analyse de questionnaires, d'entretiens, de mesures psychophysiologiques, comportementales, etc. Au-delà des apports de connaissance en neurosciences (fonctionnement cérébral de l'homme en situation réelle ou réaliste), ce type d'approche renforce la fiabilité et la richesse des résultats.

À titre d'exemple, nous rapporterons l'expérimentation de Hsieh, Seaman et Young (2010) sur la conduite automobile et les mécanismes neuronaux mis en jeu en situation de communication. Dans cette étude de conduite simulée, trois conditions expérimentales sont analysées : conduite sans

communication, conduite avec communication téléphonique neutre et conduite avec communication téléphonique à fort potentiel émotionnel. Trois types de mesures sont réalisées : comportementales, EEG et IRMf. L'activation des aires cérébrales en fonction des différentes conditions est comparée, puis confrontée à la littérature. Les résultats sont complétés par des mesures comportementales. La condition « communication » montre une activation des aires du langage et de l'attention avec une augmentation du temps de réaction : une situation de communication dégrade donc les performances de conduite. Mais l'étude révèle que les communications neutres dégradent de manière plus importante la tâche de conduite, que ne le font les communications à fort potentiel émotionnel, comme la colère : l'émotion aurait donc un effet bénéfique sur la conduite lors des situations de communication.

IV.2. LE NEUROMARKETING OU NEUROSCIENCES DU CONSOMMATEUR¹

Les chercheurs en neuromarketing, en analysant l'activité cérébrale des consommateurs, tentent de comprendre ce qui oriente les préférences et les décisions d'achat lorsque ces derniers sont confrontés aux marques, aux publicités ou encore aux produits. Ces recherches, rapportées par exemple dans les récents ouvrages de Zurawicki (2010) ou bien de Rouillet et Droulers (2010), permettent de compléter les analyses comportementales en étudiant à leur source les processus non conscients et émotionnels. Des cabinets de neuromarketing (USA, Europe, Asie, etc.) proposent désormais aux entreprises une nouvelle offre en marketing. Les techniques d'IRMf et d'EEG sont de loin les plus utilisées, les analyses reposant principalement sur l'observation de l'activation de zones cérébrales ou sur la manifestation de rythmes cérébraux particuliers.

En neuromarketing, de nombreuses études portent sur l'impact de la publicité. D'après Tupper et Cicerone (1991), les premières analyses EEG relatives aux effets de la télévision et de la publicité datent des années 1970/1980. Les études en neuromarketing portent principalement sur l'attention, la mémorisation et les émotions provoquées par la publicité (Rossiter, Silberstein, Harris & Nield, 2001 ; Vecchiato et al., 2010 ; Treleven-Hassard et al., 2010). Rouillet et Droulers (2010), rapportent comment les analyses cérébrales permettent de révéler le biais de conformisme : alors qu'une publicité est jugée négativement par des mesures traditionnelles (par ex., entretiens), les réactions cérébrales associées démontrent des résultats différents. Ainsi, de tels résultats peuvent encourager la marque à maintenir son spot publicitaire, alors qu'elle l'aurait probablement retiré si elle s'était appuyée sur les résultats produits par une méthodologie d'enquête classique.

Un certain nombre d'études traitent de l'attrance des consommateurs vers une marque (Paulus & Frank, 2003) ou bien de la qualité perçue

1. Dans la littérature scientifique le neuromarketing n'est pas toujours synonyme de neurosciences du consommateur : le neuromarketing serait l'application par les entreprises des connaissances neuroscientifiques sur le consommateur (Hubert & Kenning, 2008).

du produit en fonction de la marque (McClure et al., 2004). Dans une expérience menée avec la technique d'IRMf par Plassmann, O'Doherty, Shiv et Rangel (2008) sur le rapport entre prix et produit, 20 participants ont donné leur appréciation gustative sur 3 types de vins dont le prix a été manipulé (augmentation du prix initial de 900 % pour l'un des vins et diminution de 900 % pour l'autre). Les résultats montrent que l'appréciation du vin est proportionnelle à l'augmentation du prix, et que cette appréciation est associée à une augmentation de l'activité du cortex orbito-frontal, une zone qui serait impliquée dans les expériences agréables. Les décisions d'achat sont également analysées, au moyen d'IRMf (Knutson, Rick, Wimmer, Prelec & Loewenstein, 2007) ou d'EEG (Jones, Childers & Jiang, 2011).

Au vu des résultats présentés précédemment, nous pouvons aisément admettre que les outils de neuro-imagerie viennent compléter les mesures traditionnelles existantes en améliorant notamment l'objectivité des résultats. Des problématiques plus concrètes pour le marketing peuvent découler de ces études, comme savoir pourquoi un consommateur choisira un objet parmi tant d'autres dans un rayon de magasin. Des travaux révèlent que la marque et le design de l'emballage auraient une influence sur les choix des consommateurs (Stoll, Baecke & Kenning, 2008 ; Hubert, Hubert, Sommer & Kenning, 2009).

IV.3. DU NEUROESTHÉTISME AU NEURODESIGN

La neuroesthétique est l'étude des processus neuronaux mis en jeu lors de l'appréciation d'œuvres artistiques : arts visuels, littérature, musique et cinéma (Skov & Vartanian, 2009). Les premiers travaux ayant eu recours à l'imagerie cérébrale pour étudier le jugement esthétique ont principalement porté sur le jugement d'œuvres d'art : photographies en MEG (Cela-Conde et al., 2004), sculptures en IRMf (Di Dio, Macaluso & Rizzolatti, 2007) et musique en TEP (Blood & Zatorre, 2001). Dans Vartanian et Goel (2004) ou Kawabata et Zeki (2004), les participants avaient pour tâche de juger différents types de peintures (paysages, natures mortes, abstraites...). L'expérimentation était menée en IRMf et avait pour but de rechercher une corrélation entre les préférences esthétiques et l'activation de zones cérébrales particulières. Les résultats montrent une activation du cortex orbitofrontal dès lors que la perception d'une peinture est jugée attrayante par les participants.

Simultanément, des études sur les produits industriels ont commencé à voir le jour sous l'éclairage des neurosciences. Erk, Spitzer, Wunderlich, Galley et Walter (2002), ont analysé l'attractivité de 12 humains pour des voitures en fonction du modèle (sportive, berline et compacte). L'analyse IRMf montre une activation des neurones du circuit de récompense associée aux voitures sportives qui sont jugées plus attirantes. Bar et Neta (2007) ont réalisé une étude IRMf similaire portant cette fois-ci sur plusieurs centaines d'objets de la vie courante. Chaque objet avait sa version arrondie, angulaire et mixte (par exemple une bougie ronde, une carrée et une présentant autant de formes arrondies qu'angulaires). Il en ressort que les objets

arrondis plaisent plus. Selon les auteurs, c'est l'amygdale qui entre en jeu, les neurones de cette zone s'activent à la vue des objets anguleux, car ils seraient tranchants et représenteraient donc un danger potentiel.

Comme le soulignent Droulers et Roulet (2009) ainsi que Roulet et Droulers (2010), il existerait des arguments forts en faveur de l'existence d'une beauté objective qui s'appliquerait aux œuvres d'art mais qui pourrait également s'appliquer aux produits industriels en manipulant les couleurs, les formes et les matériaux. Cette idée renforce l'importance du design en conception, en apportant de nouvelles méthodes pour les concepteurs et designers industriels. L'aspect extérieur des produits a donc un rôle émotionnel très important (Motte, 2009), notamment pour motiver un acte d'achat. La question se pose alors du recours à l'analyse de l'activité cérébrale pour l'évaluation des interactions entre un utilisateur et un produit. Nous exposons dans la section suivante des études qui amorcent une telle approche, que nous pourrions nommer neuroergonomie de conception ou neuro-utilisabilité, dont le but serait d'analyser l'activité cérébrale d'un utilisateur en situation d'interaction avec un produit ou une interface.

V. VERS UNE NEUROERGONOMIE DE CONCEPTION OU UNE NEURO-UTILISABILITÉ ?

Le recours à certaines techniques comme la MEG, la TEP ou l'IRMf dans des protocoles expérimentaux est parfois rendu difficile en raison de la contrainte inhérente à la technique elle-même. Les participants se trouvent en effet dans une situation inconfortable (immobilité, bruit, stress...), voire invasive comme dans le cas de la TEP, qui implique de subir une injection dans le sang d'un traceur radioactif. Le recours à l'EEG se révèle être une des techniques les moins intrusives pour évaluer l'activité cérébrale liées aux fonctions cognitives mises en jeux lors de l'interaction avec un produit : l'appareillage est léger et laisse une liberté d'action indispensable à l'étude de la situation d'usage. De plus, cette technique possède une excellente résolution temporelle, ce qui est idéal pour la chronométrie des opérations mentales lors de l'interaction humain/produit. L'acquisition du signal EEG correspond à l'activité cérébrale à un instant donné. Pour associer le signal à une fonction cognitive, la mise en situation devra être réalisée plusieurs dizaines de fois pour aboutir à un moyennage des données. Il faut souligner que les méthodes d'imagerie cérébrale peuvent présenter des inconvénients en ce qui concerne l'interprétation des résultats. Comme pour toute méthode en psychophysologie (ECG, EMG, ERG, etc.), le biosignal peut être gêné par diverses interférences ou bruits (Cacioppo, Tassinari, & Berntson, 2007). Les tracés EEG peuvent ainsi être perturbés par de nombreux facteurs comme des interférences électromagnétiques, les mouvements de l'individu ou encore certains signaux physiologiques (battements cardiaques, mouvements oculaires, etc.), ce qui gêne leur interprétation. Mais la littérature sur cette technologie est suffisamment ancienne et étayée pour encadrer et guider les phases d'enregistrement et d'analyse

(Dement & Kleitman, 1957 ; Ray & Cole, 1985 ; Gwin, Gramann, Makeig & Ferris, 2010). Il existe des logiciels et algorithmes qui permettent de nettoyer les données brutes afin de faciliter leur interprétation. De plus, certaines recherches portent exclusivement sur l'identification des formes et sources de bruits afin de les anticiper et de les supprimer (Repovš, 2010).

Quelques travaux ont étudié l'interaction entre un utilisateur et une interface à travers l'enregistrement d'un EEG. L'étude de Schier (2000) portait sur l'évaluation de l'attention dans un jeu de course automobile. Après quelques minutes d'apprentissage, les participants devaient réaliser six tours de pistes sur un simulateur de conduite avec volant et pédalier. L'enregistrement EEG était effectué sur deux tours, pendant la tâche de conduite et pendant la tâche d'observation (*replay*). De la même manière l'étude de Smith, Gevins, Brown, Karnik et Du (2001) a utilisé une tâche de simulation (avec des niveaux de difficulté bas, modéré et haut) ainsi qu'une tâche d'observation passive, dans un simulateur de vol. Dans les deux cas, les auteurs se sont intéressés à l'onde Alpha, associée dans la littérature au calme et à la relaxation : nous indiquons dans la figure 3 le positionnement des électrodes au niveau des lobes frontaux (F) et pariétaux (P) dans ces deux études. Les auteurs ont observé une augmentation de l'activité de cette onde principalement en observation passive, mais également dans les tâches les moins coûteuses cognitivement.

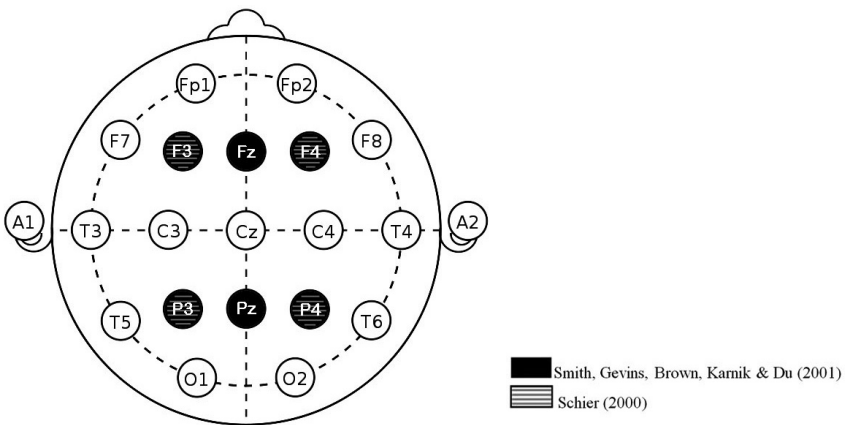


Figure 3 : Localisation des électrodes pour l'enregistrement de l'onde Alpha à partir du système international 10-20.

Figure 3: International 10-20 location for Alpha wave recording.

D'autres expérimentations en EEG ont porté sur l'impact cognitif et émotionnel provoqué par les jeux vidéo en analysant principalement l'activité de l'onde Thêta (Salminen & Ravaja, 2008 ; He, Yuan, Yang, Sheikholeslami & He, 2008 ; Nacke, Stellmach & Lindley, 2011). Cette onde est impliquée dans les situations de rêveries, d'activités créatives et d'émotion, mais apparaît également lors de certains efforts cognitifs. Les jeux vidéo peuvent engendrer des phénomènes émotionnels liés à l'activité

elle-même (tirer sur des adversaires, faire le meilleur temps...). Récemment, les effets de charge mentale et d'apprentissage ont également été analysés à l'aide d'un EEG (Brouwer, Hogervorst, Holewijn & van Erp, 2014), notamment chez des développeurs logiciel afin d'anticiper les erreurs de programmation (Fritz, Begel, Müller, Yigit-Elliott & Züger, 2014).

En ce qui concerne l'analyse de l'interaction d'un utilisateur avec des produits, nous citerons trois études qui ont particulièrement retenu notre attention. La première évalue, à partir de l'onde Alpha, le calme et la relaxation associés à l'utilisation de différents types de stylos (Tomico et al., 2008). Les auteurs parviennent à identifier les stylos les plus confortables à manipuler pour les utilisateurs. Des entretiens sont également réalisés (*Repertory Grid*; Kelly, 1955), pour vérifier les concordances entre mesures subjectives et objectives. Sans pouvoir relier systématiquement les résultats des deux méthodes, des liens ont cependant pu être identifiés sur certains stylos.

La seconde étude porte sur une action de la vie courante : la préparation d'un café. L'interaction est simulée, il s'agit seulement de réaliser l'action par la pensée notamment pour éviter une activation des régions motrices. Les auteurs mesurent l'activité cérébrale (EEG) et la température corporelle (thermographie infrarouge) des participants durant la simulation. Une fois le test terminé, un questionnaire développé par les auteurs est administré (*Affective Self Report*) pour contrôler la dimension affective et l'engagement des participants vis-à-vis de la tâche réalisée. Les résultats indiquent de fortes corrélations entre les différentes mesures effectuées : amplitudes EEG, température corporelle et questionnaire ASR (Jenkins, Brown & Rutterford, 2009).

La troisième étude évalue les préférences des utilisateurs entre deux périphériques de jeux vidéo (une manette classique et une Wiimote), durant une partie de jeu. L'EEG vient compléter les mesures subjectives utilisées dans le domaine du jeu vidéo (*Game Experience Questionnaire* et *MEC Spatial Presence Questionnaire*). Les résultats de chaque outil sont analysés indépendamment, puis des corrélations sont recherchées. Parmi les résultats nous pouvons évoquer la corrélation des ondes Alpha et Delta avec des affects négatifs et de tension lors de l'utilisation de la manette classique. Ces résultats soulèvent des questions puisque l'onde Delta est habituellement associée au sommeil (Nacke, 2010). Ceci amène les auteurs à s'interroger sur la véracité des corrélats comportementaux qui sont associés aux ondes cérébrales dans la littérature scientifique.

Considérant cette revue de la littérature, il apparaît que les techniques d'imagerie cérébrale peuvent être des outils de très grande valeur pour nous informer sur la cognition des utilisateurs en situation d'interaction humain/produit. Elles pourraient permettre d'enrichir l'analyse de l'existant (lacunes et défauts des produits concurrents, en termes de confort d'usage et de charge mentale) et l'analyse du besoin (analyse d'une situation avant introduction du nouveau produit). Elles permettraient ensuite d'approfondir l'évaluation des concepts de solutions, des prototypes ou des produits dans le cycle de conception, aussi bien au niveau des principes techniques, du design, que lors de l'évaluation de l'utilisabilité (performance, satisfaction, confort...). Les techniques d'imagerie étant complémentaires, l'idéal serait de pouvoir obtenir des informations combinées issues de plusieurs

techniques (Joliot, 2002). Mais l'imagerie « multimodale » est encore peu développée (coût, défis techniques...). Avant de pouvoir en arriver là, l'EEG, de par son accessibilité et sa flexibilité, pourrait être l'une des techniques de référence dans cette nouvelle catégorie de recherche.

VI. DISCUSSION

Les produits actuels sont de plus en plus complexes mais doivent cependant rester « faciles à utiliser ». Cette notion renvoie aux notions d'efficacité, d'efficience, de satisfaction ou encore d'acceptabilité (Brangier & Barcenilla, 2003 ; Barcenilla & Bastien, 2009). L'évaluation de l'utilisabilité est une étape très importante en conception centrée utilisateurs, car elle contribue à évaluer si le produit répond aux besoins et attentes des usagers. Cette évaluation repose notamment sur la mise en œuvre de méthodes qui doivent être conduites sur la population utilisatrice future.

La grande majorité des méthodes en sciences humaines et sociales et en ergonomie recourent à l'observation des comportements et à l'enregistrement des verbalisations (Blanchet, Ghiglione, Massonnat & Trognon, 1998 ; Leplat, 2000 ; Norimatsu & Pigem, 2008). Les outils qui en découlent (situations d'utilisation réelles ou simulées, entretiens, questionnaires, focus group, etc.) permettent d'obtenir, outre des métriques de performance, des données observationnelles et discursives (Dix et al., 1993 ; Brangier & Barcenilla, 2003 ; Baccino, Bellino & Colombi, 2004). Cependant ces données sont soumises, selon les cas, soit à la subjectivité des utilisateurs, soit à celle de l'analyste. La grande limite de l'observation réside dans le fait que tout n'est pas observable, ce qui peut entraîner de mauvaises interprétations de la part de l'analyste. Si les techniques de verbalisations, d'entretiens et de questionnaires permettent de pallier cela, les verbalisations peuvent véhiculer un certain nombre de biais cognitifs (Neuman, 1991 ; Bernard, 2000). Les biais cognitifs sont des distorsions que subissent les informations qui entrent ou sortent du système cognitif (Le Ny, 2011).

Parmi ces biais qui peuvent altérer les données, nous pouvons citer :

- Le *biais de conformisme* (Moore, 1921) qui peut apparaître dans les *focus group* lorsqu'un utilisateur n'a pas le même avis que les autres personnes présentes. Il cachera son avis et se conformera à celui de la majorité.
- Le *biais de désirabilité sociale* (Crowne & Marlowe, 1960), qui peut apparaître lorsque l'utilisateur rencontre des difficultés sur une tâche mais ne le dira pas pour ne pas être jugé.
- *L'illusion d'introspection* (Nisbett & Wilson, 1977) : les utilisateurs n'ont pas toujours accès à leurs pensées, certaines opérations mentales sont non conscientes et donc inaccessibles.
- Le *biais de négativité* (Baumeister, Bratslavsky, Finkenauer, & Vohs, 2001) : dans une situation d'interaction, les utilisateurs pourraient privilégier les aspects négatifs par rapport aux aspects positifs car il est plus simple de s'en souvenir.

- Le *biais de non-réponse* (Groves, Dilman, Eltinge, & Little, 2002), qui apparaît surtout dans les questionnaires *a posteriori* : l'utilisateur peut omettre volontairement ou involontairement certaines réponses à des questions.
- Enfin le *biais de verbalisation* (Vivier, 2008) apparaît lorsque l'utilisateur n'arrive pas à mettre des mots sur son ressenti.

Les figures 4 et 5 ci-dessous proposent une estimation globale de la performance des principaux outils méthodologiques utilisés en ergonomie de conception. Les difficultés d'interprétation des données comportementales et les biais cognitifs que nous venons de citer nous amènent à considérer les méthodes verbales (focus group, questionnaires...) comme étant faiblement objectives et les méthodes d'observation (simulation, tests utilisateurs...) comme étant moyennement objectives. À l'inverse, les travaux rapportés plus haut en neuroergonomie et neuromarketing suggèrent que l'imagerie cérébrale permet d'observer plus précisément certains processus cognitifs (ex : phénomènes attentionnels et émotionnels rapportés par Hsieh, Seaman et Young, 2010) et de dépasser certains biais cognitifs (ex : biais de conformisme rapportés par Rouillet et Droulers, 2010). C'est pourquoi nous accordons un niveau d'objectivité plus important aux méthodes d'imagerie cérébrale (figure 4). Il faut cependant noter que ces techniques impliquent des choix dans les mesures de l'activité cérébrale (ex : ligne de base, conditions, choix statistiques, interprétation) qui comportent eux aussi une part de subjectivité.

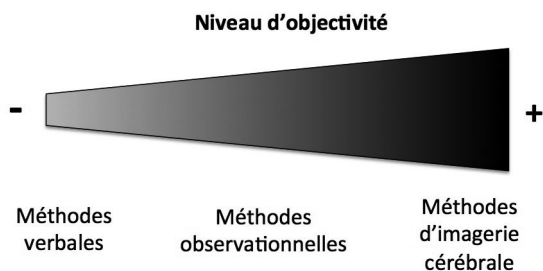


Figure 4 : Appréciation du niveau d'objectivité en fonction du type de méthode d'évaluation : méthodes observationnelles, méthodes verbales et méthodes d'imagerie cérébrale.

Figure 4: Performance estimate of objectivity according to the type of evaluation method: behavioral observation methods, verbal methods and brain imaging methods.

Nous pouvons également ajouter que l'observation et la production langagière ne sont pas forcément adaptées à toutes les populations d'utilisateurs, laissant des résultats parfois difficilement interprétables. L'évaluation de l'utilisabilité de produits ou de logiciels est par exemple difficile en ce qui concerne les jeunes enfants (Hanna, Ridsen & Alexander, 1997) ou encore les personnes atteintes de pathologies comme la maladie d'Alzheimer (Duchossoy, Buisine, Maranzana & Roosen, 2011). Il est difficile en effet de comprendre le comportement de ces utilisateurs et la discussion est

souvent impossible. En revanche, des études ont déjà utilisé l'EEG sur des enfants (Linden, Habib, & Radojevic, 1996 ; Pellouchoud et al ., 1999) et des personnes souffrant de la maladie d'Alzheimer (Klimesch, Schimke, Ladurner, & Pfurtscheller 1990 ; Le Roc'h, Rancurel, Poitrenaud, Bourgin & Sebban, 1993) pour analyser leurs processus cognitifs (attention, mémorisation...). Pour le second critère (adaptabilité à la population étudiée), nous faisons donc également l'hypothèse que l'imagerie cérébrale pourrait enrichir l'analyse d'usage en conception (figure 5).

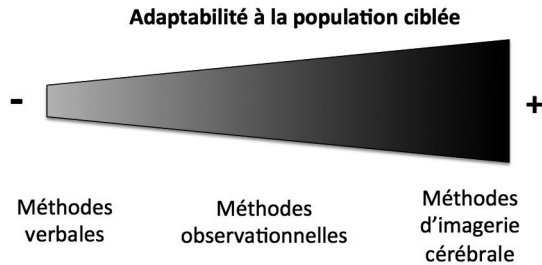


Figure 5 : Appréciation de l'adaptabilité à la population, en fonction du type de méthode d'évaluation : méthodes observationnelles, méthodes verbales et méthodes d'imagerie cérébrale.

Figure 5: Performance estimate of adaptability to population, according to the type of evaluation method: behavioral observation methods, verbal methods and brain imaging methods.

Nous considérons également un troisième critère de performance correspondant à la possibilité d'utiliser chaque méthode tout au long du processus de conception : dès l'analyse du besoin en amont de la conception, jusqu'à l'évaluation du produit final, en passant par l'évaluation de concepts, de maquettes non-fonctionnelles, puis de prototypes. Pour ce critère, les méthodes de verbalisation obtiennent une appréciation maximale car elles ne requièrent aucun support ni aucune donnée de sortie du processus de conception. Les méthodes observationnelles en revanche nécessitent d'avoir un produit ou une situation matérialisée à tester : soit un produit existant pour recueillir en amont le besoin, soit une représentation intermédiaire du futur produit en cours de conception. Or dans les projets d'innovation de rupture, la conception débute sans avoir de produit ou de situation de référence à tester : ce cas nous amène à accorder une appréciation intermédiaire à l'observation pour ce critère. Enfin, nous ne possédons pas aujourd'hui de connaissances suffisantes en imagerie cérébrale pour estimer son intérêt dans les phases amont de la conception : nous pouvons faire l'hypothèse qu'elle sera utile pour l'analyse des maquettes, prototypes et des produits, mais est-ce que la simulation mentale des besoins et usages en amont de la conception pourra apporter des données exploitables aux concepteurs ? Ce type de question fait partie des problématiques que nous souhaitons explorer dans la suite de nos travaux concernant l'utilisation de l'imagerie cérébrale en conception.

VII. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous venons de présenter un état de l'art de l'utilisation des techniques d'imagerie cérébrale par des disciplines comme l'informatique, l'ergonomie ou encore le marketing. Ces disciplines s'inscrivent dans deux champs de recherche avec des finalités différentes, l'un visant à substituer des fonctions motrices et cognitives (*BCI* et *Augmented Cognition*, avec l'objectif de modifier et d'enrichir l'activité) et l'autre souhaitant apporter de nouvelles connaissances sur l'humain (*Neuroergonomie*, *Neuromarketing* et *Neuroesthétisme*, avec l'objectif de perturber le moins possible l'activité). Ce second champ de recherches étudie les fonctions cérébrales de l'humain dans son environnement naturel, comme les activités de la vie quotidienne (situation de travail, achat de biens de consommation ou préférences esthétiques). Les expérimentations portent sur la localisation des structures cérébrales ou bien sur le type d'ondes cérébrales activées pour rechercher et valider des hypothèses. Les résultats de ces études, menées dans des contextes nouveaux, participent à l'enrichissement des connaissances sur l'organisation anatomo-fonctionnelle du cortex cérébral. L'avènement de ces nouvelles disciplines pose cependant des questions éthiques qui mobilisent un grand nombre de chercheurs issus de domaines divers. De nombreuses institutions scientifiques, politiques ou citoyennes s'interrogent sur l'aspect moral de ces recherches et la manière de pouvoir les encadrer. La neuroéthique « traite des bénéfices et des dangers potentiels des recherches modernes sur le cerveau... à l'interface des sciences empiriques du cerveau, de la philosophie de l'esprit, de la philosophie morale, de l'éthique et des sciences sociales » (Evers, 2009).

Les techniques d'imagerie cérébrale pourraient contourner les limites de certaines techniques utilisées actuellement en sciences humaines et sociales, reposant essentiellement sur l'analyse de données comportementales et langagières. Nous pourrions alors obtenir des informations plus objectives sur l'analyse des situations d'usage des produits et évaluer des catégories de populations qui, jusqu'à présent, étaient sous-représentées dans ce genre d'études. Ces nouveaux outils d'évaluation potentiels seraient utilisés en conception de produits par les ergonomes ainsi que l'ensemble de l'équipe de conception pour fiabiliser et enrichir le processus de conception. L'objectif sera de limiter les itérations de modification des produits pour optimiser le triptyque coût/qualité/délai, et évidemment pour combler les utilisateurs en leur apportant des produits plus efficaces, efficaces et satisfaisants.

RÉFÉRENCES

- Afonso, A. (2006). *Propriétés analogiques des représentations mentales de l'espace : Etude comparative auprès de personnes voyantes et non-voyantes*. Thèse de doctorat. Université Paris-Sud, Orsay, France.
- Baccino, T., Bellino, C., & Colombi, T. (2004). *Mesure de l'utilisabilité des interfaces*. Paris: Hermès Sciences.
- Bar, M., & Neta, M. (2007). Visual elements of subjective preference modulate amygdala activation. *Neuropsychologia*, 45(10), 2191-2200.

- Barcenilla, J., & Bastien, J. M. C. (2010). L'acceptabilité des nouvelles technologies: quelles relations avec l'ergonomie, l'utilisabilité et l'expérience utilisateur? *Le Travail Humain*, 72(4), 311-331.
- Barthe B., Quéinnec Y., & Verdier F. (2004). L'analyse de l'activité de travail en postes de nuit : bilan de 25 ans de recherches et perspectives. *Le Travail Humain*, 67(1), 41-61.
- Baumeister, R. F., Bratslavsky, E., Finkenauer, C., & Vohs, K. D. (2001). Bad is stronger than good. *Review of General Psychology*, 5(4), 323-370.
- Bernard, H. R. (2000). *Social research methods: qualitative and quantitative Approaches*. California: Sage Publication.
- Blanchet, A., Ghiglione, R., Massonnat, J., & Trognon, A. (1998). *Les techniques d'enquête en sciences sociales*. Paris: Dunod.
- Blood, A. J., & Zatorre, R. J. (2001). Intensely pleasurable responses to music correlate with activity in brain regions implicated in reward and emotion. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(20), 11818-11823.
- Brangier, E., & Barcenilla, J. (2003). *Concevoir un produit facile à utiliser*. Paris: Éditions d'Organisation.
- Brouwer, A. M., Hogervorst, M. A., Holewijn, M., & van Erp, J. B. (2014). Evidence for effects of task difficulty but not learning on neurophysiological variables associated with effort. *International Journal of Psychophysiology*, 93(2), 242-252.
- Cabon, P., Bourgeois-Bougrine, S., Mollard, R., Coblentz, A., & Speyer, J.-J. (2003). Electronic pilot-activity monitor: a countermeasure against fatigue on long-haul flights. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 74(6), 679-682.
- Cacioppo, J. T., Tassinary, L. G., & Berntson, G. G. (2007). *Handbook of psychophysiology*. New York: Cambridge University Press.
- Calhoun, V. D., McGinty, V., Pekar, J., Watson, T., & Pearlson, G. (2001). Investigation of marinol (THC) effects upon fMRI activation during active and passive driving using independent component analysis and SPM. *NeuroImage*, 13(6), 388.
- Calhoun, V. D., Pekar, J. J., & Pearlson, G. D. (2004). Alcohol intoxication effects on simulated driving: exploring alcohol-dose effects on brain activation using functional MRI. *Neuropsychopharmacology*, 29(11), 2097-2107.
- Causse, M. (2010). *Influence de la récompense et de l'âge sur la performance de pilotage : une contribution de la neuroergonomie à la sécurité aérienne*. Thèse de doctorat. Université de Toulouse, France.
- Causse, M., Péran, P., Dehais, F., Caravasso, C. F., Zeffiro, T., Sabatini, U., & Pastor, J. (2013). Affective decision making under uncertainty during a plausible aviation task: An fMRI study. *NeuroImage*, 71(1), 19-29.
- Cela-Conde, C. J., le Marty, G., Maestu, F., Ortiz, T., Munar, E., Fernandez, A., Roca, M., Rossello, J., & Quesney, F. (2004). Activation of the prefrontal cortex in the human visual aesthetic perception. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(16), 6321-6325.
- Crowne, D. P., & Marlowe, D. (1960). A new scale of social desirability independent of psychopathology. *Journal of Consulting Psychology*, 24(4), 349-354.
- Dement, W., & Kleitman, N. (1957). Cyclic variations in EEG during sleep and their relation to eye movements, body motility, and dreaming. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 9(4), 673-690.
- Di Dio, C., Macaluso, E., & Rizzolatti, G. (2007). The golden beauty: brain response to classical and renaissance sculptures. *PLoS ONE* 2(11), e1201.
- Dix, A. J., Finlay, J. E., Abowd, G. D., & Beale, R. (1993). *Human-computer interaction*. Londres: Prentice Hall.
- Dixon, K., Hagemann, K., Basilico, J., Forsythe, C., Rothe, S., Schrauf, M., & Kincses, W. (2009). Improved team performance using EEG- and context-based cognitive-state classifications for a vehicle crew. Dans D. Schmorow, I. Estabrooke & M. Grootjen (Edit.), *Foundations of Augmented Cognition*.

- Neuroergonomics and Operational Neuroscience* (p. 365-372). Berlin/Heidelberg: Springer.
- Droulers, O., & Roulet, B. (2009). Neuroesthétique automobile : les neurosciences et le design dans l'industrie automobile. Dans L. Marco (Edit.), *Management & sciences sociales. Marketing et design : Un bilan prospectif* (p. 131-156). Paris: L'Harmattan.
- Duchossoy, M., Buisine, S., Maranzana, N., & Roosen, C. (2011). *Conception d'un protocole d'évaluation ergonomique d'un produit destiné aux patients atteints de troubles sévères de la maladie d'Alzheimer*. Communication présentée à CONFERE, Montbéliard, France.
- Erk, S., Spitzer, M., Wunderlich, A. P., Galley, L., & Walter, H. (2002). Cultural objects modulate reward circuitry. *Neuroreport* 13(18), 2499-2503.
- Evers, K. (2009). *Neuroéthique: Quand la matière s'éveille*. Paris: Odile Jacob.
- Felton, E. A., Williams, J. C., Vanderheiden, G. C., & Radwin, R. G. (2012). Mental workload during brain-computer interface training. *Ergonomics*, 55(5), 526-537.
- Fiori, N. (2006). *Les neurosciences cognitives*. Paris: Armand Colin.
- Fritz, T., Begel, A., Müller, S. C., Yigit-Elliott, S., & Züger, M. (2014). *Using psycho-physiological measures to assess task difficulty in software development*. Communication présentée à ICSE: International Conference on Software Engineering, Hyderabad, India (p. 402-413).
- Graimann, B., Allison, B., & Pfurtscheller, G. (2010). *Brain-Computer Interface. revolutionizing Human-Computer Interaction*. Springer: Berlin, Heidelberg.
- Groves, R. M., Dilman, D. A., Eltinge, J. L., & Little, R. J. A. (2002). *Survey non-response*. New York: Wiley.
- Gwin, J. T., Gramann, K., Makeig, S., & Ferris, D. P. (2010). Removal of movement artifact from high-density EEG recorded during walking and running. *Journal of Neurophysiology*, 103(6), 3526-3534.
- Hanna, L., Ridsen, K., & Alexander, K. J. (1997). Guidelines for usability testing with children. *Interactions*, 4(5), 9-14.
- He, E. J., Yuan, H., Yang, L., Sheikholeslami, C., & He, B. (2008). *EEG spatio-spectral mapping during video game play*. Communication présentée à ITAB: International Conference on Technology and Applications in Biomedicine, Shenzhen, China (p. 346-348).
- Houdé, O., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2002). *Cerveau et psychologie : Introduction à l'imagerie cérébrale anatomique et fonctionnelle*. Paris: Puf
- Hsieh, L., Seaman, S., & Young, R. (2010). *Effect of emotional speech tone on driving from lab to road: fMRI and ERP studies*. Communication présentée à 2nd International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, New York, USA, (p. 22-28).
- Hubert, M., Hubert, M., Sommer, J., & Kenning, P. (2009). Consumer neuroscience the effect of retail brands on the perception of product packaging. *Marketing Review St. Gallen*, 26(4), 28-33.
- Hubert, M., & Kenning, P. (2008). A current overview of consumer neuroscience. *Journal of Consumer Behaviour*, 7(4-5), 272-292.
- Jenkins, S., Brown, R., & Rutterford, N. (2009). Comparing thermographic, EEG, and subjective measures of affective experience during simulated product interactions. *International Journal of Design*, 3(2), 53-65.
- Joliot, M. (2002). L'intégration multimodale. Dans O. Houdé, B. Mazoyer & N. Tzourio-Mazoyer (Edit.), *Cerveau et Psychologie* (p. 317-342). Paris: Puf.
- Jones, W. J., Childers, T. L., & Jiang, Y. (2011). The shopping brain: math anxiety modulates brain responses to buying decisions. *Biological Psychology*, 89(1), 201-213.
- Kawabata, H., & Zeki, S. (2004). Neural correlates of beauty. *Journal of Neurophysiology*, 91(4), 1699-1705.

- Kelly, G. A. (1955). *The psychology of personal constructs*. New York: Norton.
- Klimesch, W., Schimke, H., Ladurner, G., & Pfurtscheller, G. (1990). Alpha frequency and memory performance. *Journal of Psychophysiology*, 4(4), 381-390.
- Knutson, B., Rick, S., Wimmer, G. E., Prelec, D., & Loewenstein, G. (2007). Neural predictors of purchases. *Neuron* 53(1), 147-156.
- Krepki, R., Blankertz, B., Curio, G., & Müller, K. R. (2007). The Berlin Brain-Computer Interface (BBCI) - towards a new communication channel for online control in gaming applications. *Journal of Multimedia Tools and Applications*, 33(1), 73-90.
- Laureys, S., Peigneux, P., & Goldman, S. (2002). Brain imaging. Dans H.A.H. D'haenen, J.A. den Boer & P. Willner (Edit.) *Biological psychiatry* (p. 155-166). Chichester: John Wiley & Sons.
- Le Ny, J-F. (2011). Biases. Dans H. Bloch, R. Chemana, E. Dépret, A. Gallo, P. Leconte, J-F. Le Ny, M. Reuchlin (Edit.), *Grand dictionnaire de la Psychologie* (p. 123). Paris: Larousse.
- Le Roc'h, K., Rancurel, G., Poitrenaud, J., Bourgin, P., & Sebban, C. (1993). Fluidité verbale et cohérence EEG dans la maladie d'Alzheimer. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, 23(5), 422-433.
- Leplat, J. (2000). *L'analyse psychologique de l'activité en ergonomie. Aperçu sur son évolution, ses modèles et ses méthodes*. Toulouse: OCTARES édition.
- Linden, M., Habib, T., & Radojevic, V. (1996). A controlled study of the effects of EEG biofeedback on cognition and behavior of children with attention deficit disorder and learning disabilities. *Biofeedback and Self-Regulation*, 21(1), 35-49.
- McClure, S. M., Li, J., Tomlin, D., Cypert, K. S., Montague, L. M., & Montague, P. R. (2004). Neural correlates of behavioral preference for culturally familiar drinks. *Neuron*, 44(2), 379-387.
- Moore, H. T. (1921). The comparative influence of majority and expert opinion. *American Journal of Psychology*, 32(1), 16-20.
- Motte, D. (2009). *Using brain imaging to measure emotional response to product appearance*. Communication présentée à 4th International Designing Pleasurable Products and Interfaces, France, Compiègne (p. 187-198).
- Nacke, L. E. (2010). *Wii mote vs. controller: electroencephalographic measurement of affective gameplay interaction*. Communication présentée à International Academic Conference on the Future of Game Design and Technology, New York, USA, (p.159-166).
- Nacke, L. E., Stellmach, S., & Lindley, C. A. (2011). Electroencephalographic Assessment of Player Experience: A Pilot Study in Affective Ludology. *Simulation Gaming*, 42(5), 632-655.
- Neuman, W. L. (1991). *Social research methods: qualitative and quantitative approaches*. Boston: Allyn and Bacon.
- Nisbett, R. E., & Wilson, T. D. (1977). Telling more than we can know: verbal reports on mental processes. *Psychological Review*, 84(3), 231-259.
- Norimatsu, H., & Pigem, N. (2008). *Les techniques d'observations en sciences humaines*. Paris: Armand Colin.
- Parasuraman, R., Baldwin, C. L., Knott, B., Warm, J. S., Finomore, V., Boehm-Davis, D., & Galster, S. M. (2012). Symposium: Neuroergonomics, technology, and cognition. *Work: A Journal of Prevention, Assessment and Rehabilitation*, 41, 5167-5171.
- Parasuraman, R., & Rizzo, M. (2007). *Neuroergonomics: the brain at work*. Oxford: Oxford University Press.
- Paulus, M. P., & Frank, L. R. (2003). Ventromedial prefrontal cortex activation is critical for preference judgments. *NeuroReport*, 14(10), 1311-1315.
- Pellouchoud, E., Smith, M. E., McEvoy, L., & Gevins, A. (1999). Mental effort-related EEG modulation during video-game play: comparison between juvenile subjects with epilepsy and normal control subjects. *Epilepsia*, 40(4), 38-43.

- Pfrieger, F. W., & Reber, M. (2013). Un nouvel aperçu des mécanismes de la communication neurone-glie. *médecine/sciences*, 29(2), 142-144.
- Plassmann, H., O'Doherty, J., Shiv, B., & Rangel, A. (2008). Marketing actions can modulate neural representations of experienced pleasantness. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(3), 1050-1054.
- Ray, W. J., & Cole, H. W. (1985). EEG alpha activity reflects attentional demands, and beta activity reflects emotional and cognitive processes. *Science*, 228(4700), 750-752.
- Repovš, G. (2010). Dealing with noise in EEG recording and data analysis. *Informatica Medica Slovenica*, 15(1), 18-25.
- Rossiter, J. R., Silberstein, R. B., Harris, P. G., & Nield, G. A. (2001). Brain-imaging detection of visual scene encoding in long-term memory for TV commercials. *Journal of Advertising Research*, 41(2), 13-21.
- Rouillet, B., & Droulers, O. (2010). *Neuromarketing. Le marketing revisité par les neurosciences du consommateur*. Paris: Dunod.
- Salminen, M., & Ravaja, N. (2008). Increased oscillatory theta activation evoked by violent digital game events. *Neuroscience Letters*, 435(1), 69-72.
- Sarter, N., & Sarter, M. (2003). Neuroergonomics: Opportunities and challenges of merging cognitive neuroscience with cognitive ergonomics. *Theoretical issues in ergonomics science*, 4(1-2), 142-150.
- Schier, M. A. (2000). Changes in EEG alpha power during simulated driving: a demonstration. *International Journal of Psychophysiology*, 37(2), 155-162.
- Skov, M., & Vartanian, O. (2009). *Neuroaesthetics*. Amityville, NY: Baywood Publishing.
- Smith, M. E., Gevins, A., Brown, H., Karnik, A., & Du, R. (2001). Monitoring task loading with multivariate EEG measures during complex forms of human-computer interaction. *Human Factors*, 43(3), 366-380.
- Sourina, O., Liu, Y., Wang, Q. & Nguyen, M. K. (2011). EEG-based personalized digital experience. Dans C. Stephanidi (Edit.), *Universal Access in Human-Computer Interaction. Users Diversity* (p. 591-599). Berlin Heidelberg: Springer.
- Stoll, M., Baecke, S., & Kenning, P. (2008). What they see is what they get? An fMRI-study on neural correlates of attractive packaging. *Journal of Consumer Behaviour*, 7(4-5), 342-359.
- Sullivan, J. J. (2003). Fighting Fatigue. *Public Roads*, 67(3), 18-23. Tiré de <http://www.fhwa.dot.gov/publications/publicroads/03sep/04.cfm>
- Tanaka, K., Matsunaga, K., & Wang, H. O. (2005). Electroencephalogram-based direction control of an electric wheelchair. *IEEE transactions on robotics*, 21(4), 762-766.
- Tomico, O., Mizutani, N., Levy, P., Takahiro, Y., Cho, Y., & Yamanaka, T. (2008). *Kansei physiological measurements and constructivist psychological explorations for approaching user subjective experience during and after product usage*. Communication présentée à International Design Conference, Dubrovnik, Croatia (p. 529-536).
- Treleven-Hassard, S., Gold, J., Bellman, S., Schweda, A., Ciorciari, J., Critchley, C., & Varan, D. (2010). Using the P3a to gauge automatic attention to interactive television advertising. *Journal of Economic Psychology*, 31(5), 777-784.
- Tsunashima, H., Yanagisawa, K., & Iwadate, M. (2012). Measurement of brain function using near-infrared spectroscopy (NIRS). Dans P. Bright (Edit.), *Neuroimaging Methods* (p. 75-98). China: InTech.
- Tupper, D. E., & Cicerone, K. D. (1991). *The Neuropsychology of everyday life: issues in development and rehabilitation*. Norwell: Kluwer Academic Publishers.
- Vartanian, O., & Goel, V. (2004). Neuroanatomical correlates of aesthetic preference for paintings. *NeuroReport*, 15(5), 893-897.
- Vecchiato, G., Astolfi, L., De Vico Fallani, F., Cincotti, F., Mattia, D., Salinari, S., ... Babiloni, F. (2010). Changes in brain activity during the observation of TV

- commercials by using EEG, GSR and HR measurements. *Brain Topography*, 23(2), 165-179.
- Vivier, J. (2008). La traduction des émotions. Approche psycholinguistique. Dans D. Mellier, P. Le Maléfan & J. Vivier (Edit.), *Le langage émotionnel, le comprendre et le parler* (p. 99-118). Mont-Saint-Aignan: Publications de l'Université de Rouen et du Havre.
- Wolpaw, J. R., & Wolpaw, E. W. (2012). *Brain-Computer Interfaces: principles and practice*. NY: Oxford University Press.
- Zurawicki, L. (2010). *Neuromarketing. Exploring the brain of the consumer*. Berlin Heidelberg: Springer.

RÉSUMÉ

Nous proposons dans cet article un état de l'art de l'utilisation de la neuro-imagerie (ou imagerie cérébrale) à des fins non médicales. Depuis quelques années sont apparues de nouvelles disciplines autour de l'imagerie cérébrale : neuroergonomie, neuromarketing, neuroesthétique. Dans la littérature, il existe deux champs de recherche ayant deux finalités différentes :

– La substitution des fonctions motrices et cognitives : Dans ce premier champ de recherche, l'humain est assisté par la technologie (informatique et mécanique) pour substituer ses actions motrices et/ou cognitives par des réponses cérébrales, dans le but de compenser un trouble moteur ou sensoriel.

– L'apport de nouvelles connaissances sur l'humain : Ce second champ concerne l'interprétation des données issues de l'imagerie. Les réponses cérébrales sont étudiées pour comprendre le fonctionnement mental ou social de l'individu sans interférer dans ses activités (conduite, actes d'achats ou situation de travail).

Nous exposons une synthèse de ces recherches émergentes et proposons un cadre prospectif pour l'utilisation des techniques d'imagerie cérébrale en conception de produit, afin de dépasser les limites des méthodes actuelles et d'améliorer l'évaluation des produits ou des concepts avec des données plus objectives. L'utilisation d'un appareillage EEG permettrait, par exemple, de mesurer la performance, l'apprentissage et la satisfaction des utilisateurs en interaction avec un produit.

Mots-clés : *Ergonomie, Neurosciences, Neuroergonomie, Outil d'évaluation, Utilisabilité, Imagerie cérébrale, EEG.*

Manuscrit reçu : mai 2013.

Accepté après révision par F. Darses : avril 2015.