

Image scientifique et modélisation :
conception et analyse d'une situation de collaboration et de
communication pour la construction d'IRM fonctionnelle à l'aide du
logiciel *EduAnatomist*

Réjane Monod-Ansaldi

Equipe ACCES – INRP

Jury

Mme Catherine Bruguière

Mme Maryline Coquidé

Mme Muriel Ney

M. Grégoire Molinatti (Directeur de mémoire)

M. Eric Sanchez (Directeur de mémoire)

M. Luc Trouche

Mémoire soutenu le 22 septembre 2009

REMERCIEMENTS

Je remercie l'INRP et le Directeur de l'équipe ACCES, Marc Desmet, qui m'ont permis de réaliser ce travail.

Je remercie Catherine Bruguière, Maryline Coquidé, Muriel Ney et Luc Trouche pour leur participation au jury.

Je remercie l'ensemble de l'équipe ACCES de l'INRP pour le développement du logiciel EduAnatomist et de la banque de données NeuroPeda sans lesquels ce travail n'aurait pu avoir lieu, mais aussi pour les encouragements à faire ce travail et particulièrement Charles-Henri Eyraud pour toutes les aides données au quotidien.

Je remercie mes directeurs de mémoire, Eric Sanchez et Grégoire Molinatti pour leurs conseils, leur collaboration dans la conception et l'observation des séances, leur soutien, leur recadrage, les lectures conseillées, la relecture de tous les fragments de ce mémoire, les bonnes discussions qui font réfléchir, et l'humour dont ils ne se sont jamais départis.

Je remercie Daniel Devallois pour son implication efficace dans la conception de la séquence d'enseignement, et son sérieux et son dynamisme dans la préparation et la réalisation des séances de classe au Lycée de Saint Julien en Genevois.

Je remercie Valérie Fontanieu et Claudine Schwartz, statisticiennes et Hélène Lample, professeur de Mathématiques, pour leurs conseils et leur relecture lors de la conception de la séance concernant le test statistique et pour la discussion des résultats.

Je remercie Philippe Daubias pour les longues discussions sur le logiciel EduAnatomist, ses explications patientes, les réponses qu'il a apportées et la relecture finale du mémoire.

Je remercie M. Bonazzi, Proviseur du Lycée Madame de Staël de Saint Julien en Genevois de m'avoir permis d'observer deux séances dans son établissement et tous les élèves de première S de ce lycée qui ont participé à cette recherche.

Je remercie François Tilquin pour la conception et le développement du logiciel « Réaction » que nous avons utilisé.

Je remercie Michel Dojat pour ses explications sur les protocoles d'acquisition des IRM, sur le traitement statistique des données et sur le vocabulaire utilisé pour désigner les images IRM.

Je remercie Michèle Gévaudan, pour son accueil dans sa classe lors d'une observation préliminaire de l'usage du logiciel EduAnatomist, et pour le travail que nous avons fait ensemble dans le cadre du master sur ce même logiciel.

Je remercie Béatrice Devallois pour son accueil à chaque expérimentation à Saint Julien.

Je remercie Philippe Féderici et mes enfants Simon Perez, Claire et Achille Monod qui m'ont aidé à comprendre certains clavardages MSN.

Je remercie Gilles Monod, pour la relecture précise de ce mémoire.

Je remercie Françoise Morel-Deville pour sa complicité et sa collaboration durant cette année de master et ses encouragements.

Je remercie Gilles, Claire, Achille, Ambroise et Simon pour leur patience et leurs encouragements.

INTRODUCTION	6
I - CONTEXTE.....	7
I.1. IRM et conception sur le cerveau en contexte de médiation scientifique	7
I.2. IRM et conception sur le cerveau en contexte d'enseignement	7
I.2.1. IRM et programmes scolaires	7
I.2.2. IRM et manuels scolaires	8
I.3. Précision du contexte de notre étude.....	8
II - CADRES THEORIQUES	9
II.1. Épistémologie de l'IRM fonctionnelle.....	9
II.1.1. Principe de l'IRM	9
II.1.2. IRM anatomiques	10
II.1.3. IRM fonctionnelles	10
II.1.4. IRMf : modèles pour la compréhension du fonctionnement cérébral	11
II.2. Sémiologie des images scientifiques.....	12
II.3. Théorie des situations	13
II.3.1. <i>Contrat didactique</i>	13
II.3.2. Situation <i>adidactique</i> et milieu	14
II.3.3. Situations didactiques, modélisation et démarche d'investigation	14
III - PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESES DE RECHERCHE	15
III.1. Question de recherche	15
III.2. Hypothèses	15
IV - METHODOLOGIE	16
IV.1. Construction d'une progression pédagogique pour l'éducation à l'IRMf.....	16
IV.1.1. Activités préliminaires	16
IV.1.2. Séance de travail sur les IRM fonctionnelles	17
IV.2. Recueil des données.....	22
IV.2.1. Activités préliminaires	22
IV.2.2. Séance de travail sur les IRMf	22
IV.3. Traitement du corpus	22
IV.3.1. Hypothèse 1	22
IV.3.2. Hypothèse 2	24
IV.3.3. Hypothèse 3	24
IV.3.4. Hypothèse 4	25

V -	RESULTATS.....	26
V.1.	Réalisation des étapes de construction de la carte par les élèves.....	26
V.1.1.	Choix des fichiers IRM	26
V.1.2.	Choix des bornes d'affichage	27
V.1.3.	Choix des coordonnées spatiales	29
V.1.4.	Retour sur l'hypothèse 1	32
V.2.	Compréhension du traitement statistique des données des IRMf.....	33
V.2.1.	Calcul de la statistique de test avec la feuille EXCEL	34
V.2.2.	Interprétation des résultats du test statistique	34
V.2.3.	Registre utilisé pour exprimer le risque associé au test	34
V.2.4.	Éléments mobilisés pour l'argumentation	34
V.2.5.	Compréhension du test statistique et réglage des bornes d'affichage	35
V.3.	Construction d'une représentation d'IRMf en tant que modélisation.....	36
V.3.1.	Informations ajoutées aux images dans les présentations <i>POWERPOINT</i>	36
V.3.2.	Références aux étapes de la construction de l'image	40
V.3.3.	Retour sur l'hypothèse 3	41
V.4.	Apports de la communication entre élèves	42
V.4.1.	Échanges concernant la construction de la carte d'activation fonctionnelle	43
V.4.2.	Échanges concernant la présentation de la carte d'activation fonctionnelle	48
V.4.3.	Retour sur l'hypothèse 4	53
VI -	DISCUSSION.....	54
VI.1.	Discussion de la méthodologie.....	54
VI.2.	Discussion des résultats	55
VI.2.1.	Obstacles liés à la compréhension du traitement statistique des données	55
VI.2.2.	Obstacles liés aux capacités de visualisation en 3D	56
VI.2.3.	Utilité et utilisabilité d' <i>EDUANATOMIST</i> et de <i>NEUROPEDA</i>	58
VI.2.4.	Propositions d'amélioration du logiciel <i>EDUANATOMIST</i>	59
VI.2.5.	Évaluation de la pertinence scientifique des images produites	61
VI.2.6.	Communication et sémiologie de la carte d'activation fonctionnelle	61
VI.3.	Images scientifiques, communication et apprentissage	62
VI.3.1.	L'éducation à l'IRMf : enjeux sociaux, éthiques et épistémologiques	62
VI.3.2.	Images scientifiques : média et ressources pour l'enseignement	63
VII -	CONCLUSION.....	65
VIII -	BIBLIOGRAPHIE	66
IX -	ANNEXES.....	70

INTRODUCTION

Les neurosciences regroupent une grande diversité de disciplines ayant pour objet d'étude l'organisation du système nerveux, son développement et son fonctionnement. Durant les dernières décennies, grâce à l'évolution des techniques d'investigation, elles ont connu un essor considérable qui s'est traduit par le renouveau des conceptions sur le cerveau, introduisant notamment le concept de neuroplasticité (Coquidé et Tirard, 2007). Les enjeux des neurosciences sont multiples : compréhension du fonctionnement cérébral et des apprentissages, mécanismes de l'addiction, diagnostic et traitement des maladies mentales et neurodégénératives, définition et représentations de l'intelligence, de l'individualité, de la normalité... Les questions qu'elles soulèvent sont d'ordre biologique, mais aussi éthique, philosophique et social.

Le développement des recherches sur le cerveau a bénéficié du développement des techniques d'imagerie cérébrale (IRM¹, MEG², TEP³...) qui permettent une approche globale du fonctionnement des réseaux et populations de neurones. Ces images numériques font aujourd'hui partie de notre univers social, tant par leurs applications médicales que par leur diffusion dans les médias. Qu'en est-il de leur enseignement ?

Depuis la dernière réforme des programmes de lycée (BOEN H.S. 7, Vol. 5, 31 août 2000), une volonté réelle a été affichée par les rédacteurs des programmes d'envisager les propriétés intégratives du système nerveux sans focaliser l'attention des élèves sur des objectifs cognitifs relatifs à son fonctionnement à l'échelle moléculaire et cellulaire comme cela était le cas précédemment (Hervé, 2007). Cependant, les expérimentations dans ce domaine sont difficiles à conduire en classe, et on peut observer un déficit d'activités pratiques dans les programmes actuels concernant le fonctionnement du cerveau. L'équipe ACCES de l'INRP qui se positionne à l'interface entre le monde des chercheurs et celui des enseignants, s'est donc engagée dans la mise au point d'outils permettant de placer les élèves en situation de recherche, à propos de l'activité cérébrale. Le logiciel *EDUANATOMIST* et la banque *NEUROPEDA* sont nés de ce travail, en collaboration avec le CEA, l'INSERM, le CNRS, des laboratoires universitaires, l'Assistance Publique des Hôpitaux (Paris, Marseille) et la société *Pentilla*⁴.

EDUANATOMIST permet de visualiser et de manipuler des IRM cérébrales anatomiques et fonctionnelles, issues du monde de la recherche, et mises à disposition des enseignants dans la banque *NEUROPEDA* qui contient aussi des ressources pédagogiques. Il est utilisé au lycée dans plusieurs classes d'enseignement général. A ce stade d'avancement du projet, on peut se demander comment *EDUANATOMIST* et *NEUROPEDA* sont exploités par les élèves, dans le cadre de l'enseignement actuel des neurosciences, et s'ils sont aussi utilisables dans un objectif plus vaste d'éducation à l'image scientifique et numérique. Ce sont ces questions générales qui ont motivé notre travail.

¹ IRM (Imagerie par Résonance Magnétique): technique d'imagerie cérébrale par des mesures de résonance magnétique nucléaire, permettant d'obtenir des informations sur la structure (images anatomiques) et l'activité (images fonctionnelles) du cerveau.

² MEG (magnétoencéphalographie): technique d'imagerie cérébrale par la mesure à la surface du crâne, des champs magnétiques produits par les neurones.

³ TEP (tomographie par émission de positons) technique d'imagerie cérébrale permettant d'étudier le débit sanguin.

⁴ Le développement d'une banque de données et d'adaptation du logiciel *Anatomist* à une utilisation pédagogique a reçu le soutien du MEN dans le cadre des projets SCHENE 2007.

I - CONTEXTE

Les IRM anatomiques et fonctionnelles se retrouvent à la fois dans les sphères scientifique, médicale, médiatique et éducative, suivant des présentations diverses et avec des objectifs particuliers.

I.1. IRM et conception sur le cerveau en contexte de médiation scientifique

Les utilisations des IRM anatomiques et fonctionnelles dans les médias ont été étudiées par différents auteurs. Dès 1997, Clément analyse leur insertion dans des articles de vulgarisation scientifique, et montre qu'elles peuvent véhiculer des idéologies même dans les revues scientifiques primaires. Dans les documentaires télévisuels, elles peuvent être présentées d'une manière esthétisée et spectaculaire, en éliminant les références au champ scientifique (Babou, 1999). Les IRM sont aussi nombreuses dans les expositions où les éléments de lecture et d'interprétation sont souvent peu explicites (Molinatti, 2007).

L'ensemble de ces travaux met en évidence des relations entre ces figurations et des conceptions largement répandues dans le public : l'approche est souvent délibérément moniste (ne dissociant pas le corps de l'âme, ou l'esprit du cerveau) pour lutter contre les obstacles de dualisme bien répertoriés (Clément 1994, 1997 et Clément, Cottancin et Febvre 1998), elle traduit souvent une tendance au localisationnisme réduisant chaque fonction cérébrale à une territorialisation précise et fixe (Molinatti, 2007). Cette territorialisation est accentuée par la présentation d'un nombre restreint d'IRMf insuffisamment explicitées. La vision innéiste⁵ qui a longtemps accompagnée les neurosciences et fait encore aujourd'hui débat, apparaît aussi souvent de manière implicite dans l'utilisation et le traitement médiatique des IRM, relayant des conceptions déterministes par le génome ou le sexe (Clément, 1997 ; Molinatti, 2007 ; Vidal et Benoit-Browaeyns, 2005) qui peuvent constituer des obstacles à la construction du concept de plasticité cérébrale.

La diffusion médiatique importante des IRM, s'accompagnant d'une relativement faible explicitation de leur mode de construction et de leur signification, fait de la neuroimagerie un enjeu de formation important. Leur potentiel convaincant ayant été montré même chez les scientifiques (McCabe et Castel, 2007), il convient d'éduquer à la lecture de ce type d'images.

I.2. IRM et conception sur le cerveau en contexte d'enseignement

I.2.1. IRM et programmes scolaires

L'évolution du traitement des neurosciences dans les programmes scolaires a été analysée par J.-C. Hervé (Hervé, 2007) pour les 30 dernières années. Il montre que les programmes sont influencés par l'avancée des découvertes scientifiques concernant le système nerveux, mais aussi par la recherche d'activités pratiques réalisables en classe, et qu'ils ne font pas toujours suffisamment place aux objectifs culturels qui permettraient aux élèves de mieux comprendre les enjeux sociaux des neurosciences actuelles.

Contrairement aux précédents, le programme 2001, actuellement en cours, fait une place à l'approche dynamique du développement et du fonctionnement du cerveau en introduisant la notion de plasticité cérébrale et propose une approche plus globalisante, moins moléculaire et cellulaire. Les conceptions des adolescents des filières scientifiques semblent d'ailleurs s'être modifiées suite à ce nouvel enseignement : leurs conceptions concernant les déterminismes de développement et de fonctionnement du cerveau passent d'une vision fixiste⁶ plutôt génétiquement déterminée en 2001,

⁵ Innéisme : conception du développement cérébral reposant entièrement sur des caractères innés, par exemple génétiques.

⁶ Fixisme : conception du fonctionnement cérébral comme un système fixe sans évolution, ni réorganisation possible.

à des systèmes de causalité linéaires doubles génétique et épigénétiques en 2005. Cependant, de 2001 à 2005, les adolescents continuent d'avoir des difficultés à considérer l'intégration des neurones dans un système de connexions et de se représenter le cerveau suivant le modèle du « cerveau-muscle » qui commande, actionne et est d'autant plus développé qu'on s'en sert (Molinatti, 2007).

L'utilisation des IRM pour l'enseignement est explicitement proposée dans le programme pour la première S de 2001, dans le thème « *Le cortex sensoriel et la plasticité du système nerveux central* » (BOEN H.S. 7, Vol. 5, 31 août 2000) au niveau de l'item « *l'information sensorielle générée à la périphérie est transmise au cortex sensoriel* » avec dans les activités proposées : « *une étude de documents d'imagerie cérébrale relatifs à l'activation du cortex sensoriel* ». Elle est aussi possible au niveau de l'item « *la neuroplasticité est une propriété générale du système nerveux central* » pour permettre « *une analyse de l'évolution de la représentation corticale des doigts des violonistes, ou de l'occupation du « cortex visuel » chez les non voyants...* ». La nécessité de développer des banques de données sur les images du cerveau en fonctionnement et des outils de traitement de ces données permettant d'apprendre à lire ces images, qui était soulignée par J-C Hervé (Hervé, 2007) a d'ailleurs été reconnue institutionnellement, et a donné lieu au projet SCHENE au sein de l'équipe ACCES de l'INRP pour la création de la banque *NEUROPEDA* et du logiciel *EDUANATOMIST* (colloque IMNE 2008⁷).

I.2.2. IRM et manuels scolaires

Une analyse des représentations du cerveau dans les manuels scolaires a été réalisée par V. Mafféo (Mafféo, 1998). Elle a considéré particulièrement la place des images médicales cérébrales (Mafféo, 1999). Dans une analyse de 4 manuels de première S, elle montre que l'utilisation des images médicales (IRM anatomiques et fonctionnelles et TEP) du cerveau dépasse généralement le stade de la simple illustration, attractive par son aspect moderne, pour servir de support de résultats, en remplaçant des expérimentations irréalisables en classe (Mafféo, 2007). Cependant, elle remarque que les protocoles de construction de ces images et les codes signifiants qui y sont associés ne sont pas toujours fournis dans les manuels.

Ainsi même dans les supports d'enseignement que représentent ces manuels, les éléments permettant de saisir la signification des IRM et leur statut d'images construites, modélisations du réel, sont souvent manquants, ce qui peut conduire à les considérer comme des « images réalistes » telles que des photographies. Ce sont ces observations qui nous ont conduits à vouloir explorer les conditions d'apprentissage de la lecture de ces IRM.

L'utilisation d'images cérébrales obtenues par scintigraphie pour l'apprentissage avait déjà été expérimentée avec des élèves de troisième (Mafféo, 1999), montrant qu'il est possible de proposer aux élèves ce type d'images pour des activités de lecture, de comparaison et de déduction de données, si le contexte de production des images est explicité (Mafféo, 2007).

I.3. Précision du contexte de notre étude

Considérant les différents éléments du contexte précédemment décrit, un professeur peut se poser les questions suivantes : comment éduquer à l'utilisation des IRM ? Quels sont les éléments que les élèves doivent savoir pour comprendre ces images ?

Nous avons donc choisi d'explorer les conditions d'apprentissage de la lecture d'image IRM visualisable avec le logiciel *EDUANATOMIST*, en classe de 1^{er}S pour l'enseignement de l'item du programme « *l'information sensorielle générée à la périphérie est transmise au cortex sensoriel* », puisque l'observation d'IRM fonctionnelle y est recommandée, et que la banque de données *NEUROPEDA* fournit un ensemble intéressant d'images sur ce sujet.

⁷ Colloque IMNE 2008: <http://www.imne.fr/>

II - CADRES THEORIQUES

L'ensemble du travail réalisé se place dans le cadre général du socio-constructivisme, considérant que l'individu construit ses savoirs par des processus d'assimilation et d'accommodation de ses savoirs préexistants aux nouveaux éléments du milieu (Piaget, 1964) et dans des interactions sociales, en communiquant avec ses pairs et les enseignants (Vygotski, 1934). En effet, pour Vygotski, l'apprentissage est considéré comme résultant d'interactions : interactions entre un sujet-apprenant et un objet à connaître, interactions avec un milieu didactique élaboré par l'enseignant, interactions avec des instruments et interactions sociales de ce sujet-apprenant avec l'enseignant et avec ses pairs.

Cette approche peut aussi être mise en relation avec la thèse de B. Latour (Latour, 1985), qui affirme que les processus d'inscription tels que la construction d'images, jouent un rôle important dans le développement des sciences, lorsqu'ils permettent d'augmenter les capacités de convaincre, plaçant ainsi au premier plan les interactions sociales et langagières dans la constitution des savoirs scientifiques.

Les cadres théoriques qui sous-tendent notre étude concernent les champs de l'épistémologie des IRM anatomiques et fonctionnelles, de la sémiologie des images scientifiques et la théorie des situations didactiques.

II.1. Épistémologie de l'IRM fonctionnelle

II.1.1. Principe de l'IRM

Le principe de la construction des IRM anatomiques et fonctionnelles est très complexe. Il a été décrit par plusieurs auteurs (Doyon, Cabanis et Iba-Zizen, 1997 ; Bardel et Clément, 1998 ; Mazoyer, 2001 ; Vion-Dury, 2002; Mafféo, 2007 ou site ACCES⁸). Nous résumerons ici les principales étapes de construction en insistant sur les relations qu'elles entretiennent entre elles, et les codages qu'elles induisent dans les images produites.

L'IRM est fondée sur la mesure de la résonance magnétique nucléaire du noyau d'hydrogène qui présente un moment magnétique et dont le comportement peut-être assimilé à celui d'un petit aimant. Lorsque l'on place un sujet dans un champ magnétique intense, les moments magnétiques de ses noyaux d'hydrogène s'orientent dans la même direction. On applique ensuite une radiofréquence (champ électromagnétique en rotation) de fréquence particulière (dite de Larmor) qui provoque l'entrée en résonance des noyaux d'Hydrogène. Lorsque l'onde électromagnétique est interrompue, le retour à l'état d'équilibre des noyaux s'accompagne d'une émission d'énergie sous forme d'une onde dont les propriétés dépendent de la quantité de noyaux et donc de la nature des tissus. Dans les techniques d'IRM, une antenne enregistre les signaux réémis pour chaque petit volume du sujet (ou voxel⁹). L'application d'un gradient magnétique dans l'espace permet de repérer les signaux qui proviennent de chaque voxel et qui dépendent de la densité de noyaux d'hydrogène et de l'interaction de ces noyaux avec le milieu moléculaire environnant. Une image 3D peut être construite en faisant correspondre à chaque voxel une intensité de gris ou une couleur en fonction de la valeur issue de la mesure.

⁸ Molinatti G., Vilain Y. et Jauzein F. site ACCES :

http://aces.inrp.fr/aces/ressources/neurosciences/methodes_etude_cerveau/imagerie_resonn_magnetiq

⁹ Voxels : pixels volumiques, petits volumes de mesure élémentaire constituant une matrice 3D permettant de construire des images 3D.

II.1.2. IRM anatomiques

Pour l'IRM anatomique, les tissus sont essentiellement différenciés par leur teneur en hydrogène, et apparaissent en niveaux de gris différents (Figure 1).

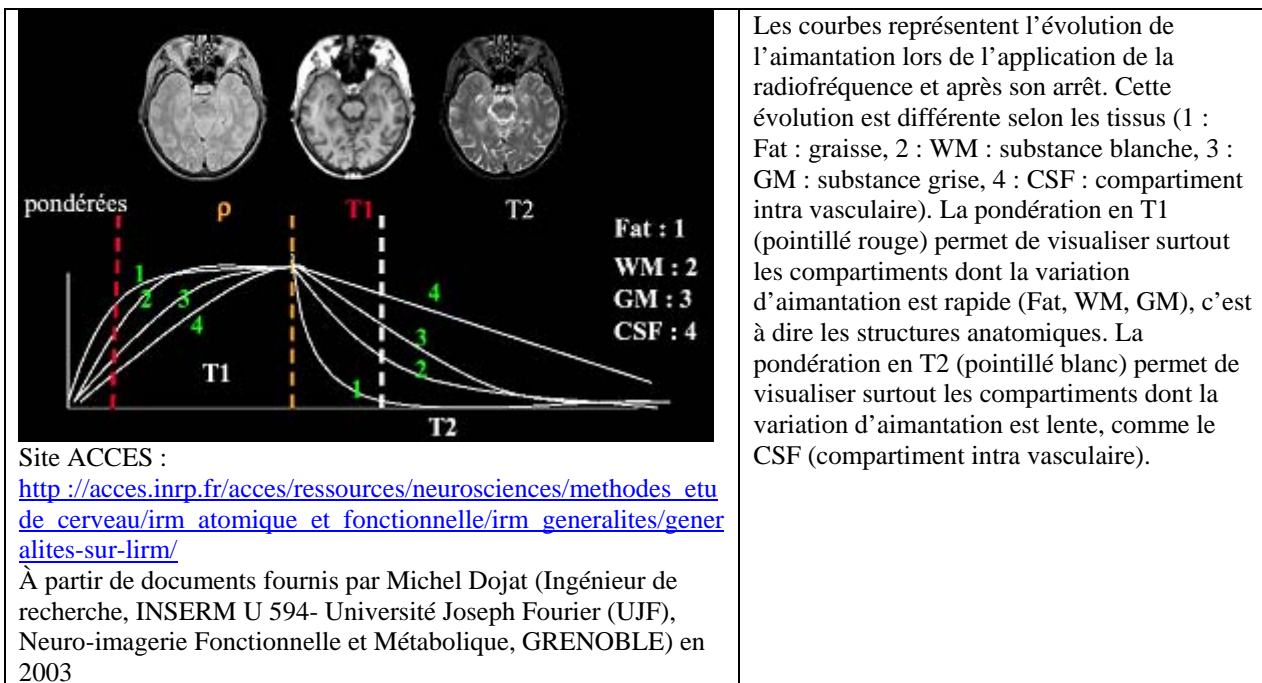


Figure 1 : IRM anatomique

Des traitements de normalisation spatiale visant à faire disparaître la variabilité des formes macroscopiques sont souvent réalisés sur les images pour lisser les différences interindividuelles. Ce lissage est nécessaire dès que l'on travaille avec des images obtenues sur différentes personnes, car la structure cérébrale varie fortement entre individus. Cette procédure permet de rendre comparables entre elles les IRM anatomiques d'individus différents. Elle induit cependant une approche normative et augmente les risques de surinterprétation.

II.1.3. IRM fonctionnelles

Les IRM fonctionnelles présentent un nombre plus élevé d'étapes de construction. Les mesures reposent sur les propriétés paramagnétiques de la désoxyhémoglobine (dHb) qui modifie les propriétés du champ magnétique autour d'elle et entraîne une atténuation du signal IRM correspondant. Dans les zones cérébrales en activité, le débit sanguin local augmente et l'afflux de sang riche en O₂ réduit la concentration relative en dHb, et se traduit par une augmentation du signal IRM local. Les IRM fonctionnelles renseignent donc surtout sur les variations locales d'oxygénation cérébrale (signal bold). Cette mesure est décalée dans le temps par rapport à celle de l'activité neuronale. D'après les études faites (Bandettini et Ungerleider, 2001) le signal bold résulterait plutôt des activités synaptiques fortement consommatrices d'énergie d'une population de neurone, que de l'activité électrique des neurones correspondant aux potentiels d'action. Rapportée au transport des messages nerveux, une augmentation du signal bold permettrait donc plutôt de détecter les entrées d'informations dans une région donnée, que les sorties en termes de messages efférents. On peut aussi rappeler ici que les synapses peuvent être excitatrices ou inhibitrices, l'augmentation de signal bold n'indiquant pas quel type de message est transmis. Enfin, la résolution volumique de cette technique est de l'ordre de quelques millimètres, ce qui correspond au moins, pour chaque voxel, à une population de plusieurs milliers de cellules nerveuses.

La mesure du signal bold produit des images brutes, pour lesquelles le rapport signal/bruit est faible, ce qui nécessite de moyenner une série de plusieurs acquisitions. Sur les images brutes ou moyennées obtenues, l'échelle de couleur code une intensité de l'irrigation du cerveau. De plus, les activités cérébrales sont multiples et ne peuvent être facilement isolées les unes des autres. La localisation de zones spécifiquement activées par une stimulation ou une activité élémentaire nécessite donc de mettre en œuvre des protocoles comparatifs particuliers. Par exemple (Figure 2), on peut réaliser une série d'acquisitions de mesures en absence de stimulation (condition *OFF*) et une autre série de mesures en présence d'une stimulation (condition *ON*).

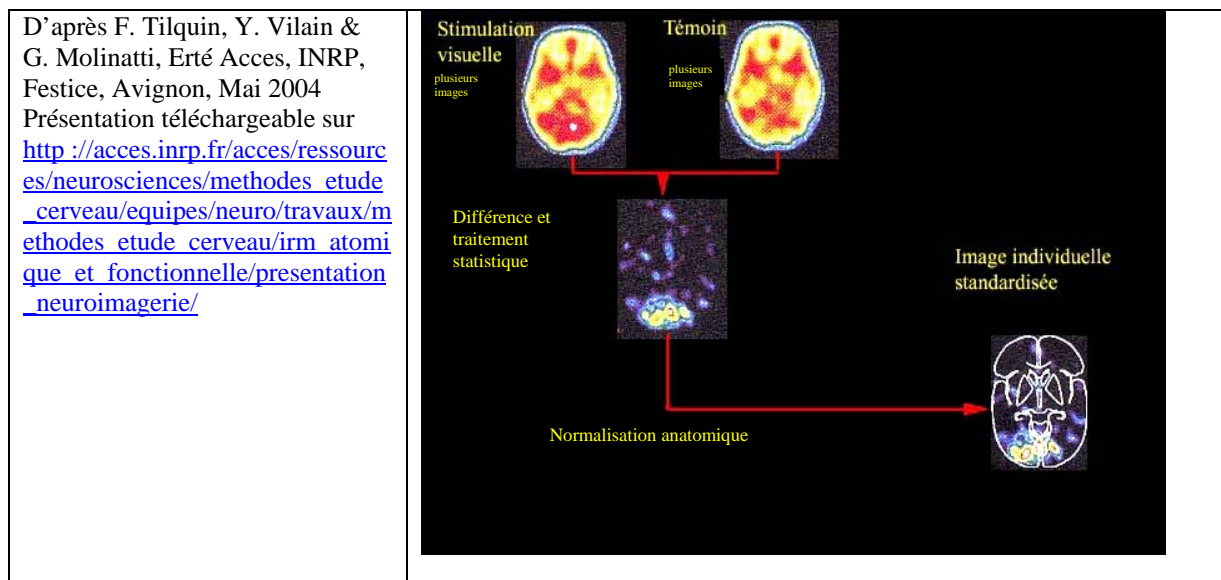


Figure 2 : Exemple d'obtention d'une IRM fonctionnelle localisant une zone spécifiquement activée par une stimulation visuelle

Des traitements statistiques seront ensuite effectués sur les différences de signal bold entre les deux conditions, pour déterminer pour quels voxels elles sont significatives. Les valeurs qui permettront de coloriser les voxels pour construire l'image, correspondront alors à des statistiques de test de différence entre deux conditions, et non à des taux d'irrigation. Les protocoles expérimentaux (ou paradigmes) utilisés pour la capture des données et leur traitement sont souvent encore plus compliqués, car ils ont pour but d'interroger des questions plus complexes que la réponse à une simple stimulation. L'imagerie par résonance magnétique est donc un processus complexe faisant intervenir différentes disciplines et nécessitant la collaboration de plusieurs individus pour une seule image (physiciens, informaticiens, statisticiens, médecins, radiologues, chercheurs).

II.1.4. IRMf : modèles pour la compréhension du fonctionnement cérébral

Notre rapide description de la construction des IRMf montre combien le statut et la compréhension de telles images dépendent de leurs protocoles d'obtention et des objectifs de leurs auteurs. Les IRM sont donc des modèles de l'anatomie et du fonctionnement du cerveau. Nous utilisons ici le terme modèle au sens que lui donne Bunge (Bunge, 1975) : des outils conceptuels élaborés par le chercheur, qui permettent de faire le lien entre théorie et réel. Dans le cas de l'investigation du fonctionnement cérébral par IRM, on retrouve d'ailleurs précisément le cheminement du chercheur décrit par Jacobi (Jacobi, 1987) comme une « focalisation progressive qui permet de transformer un réel complexe en un observable simple sur lequel le chercheur pointe toute son instrumentation pour enregistrer un changement, ou mesurer l'amplitude (ou la fréquence) d'un signal » et qui « détermine très largement le type d'image produit ». Des allers-retours entre les éléments du réel et leur modélisation sont alors nécessaires à chaque étape pour permettre au chercheur d'aborder

globalement l'image produite comme une visualisation simplifiée du réel dans un but de compréhension (Latour, 1985). La résolution de problèmes scientifiques passe par un travail de modélisation pour penser et pour comprendre le monde. Selon ce point de vue, les modèles sont au cœur de l'activité du chercheur et la modélisation est une démarche partagée par l'ensemble de la communauté scientifique.

Dans l'enseignement des sciences, les modèles ont aussi un rôle de perception et de visualisation pour construire la compréhension (Martinand, 1992, Sanchez, 2008a). Les images IRM pourraient donc être utilisées, dans un contexte scolaire, comme des modèles permettant de comprendre le fonctionnement cérébral. Cela impliquerait de ne pas éluder la complexité des étapes de leur construction, pour que des allers-retours avec le réel restent possibles.

II.2. Sémiologie des images scientifiques

D'après U. Eco (Eco, 1968), les images ou «*signes iconiques ne possèdent pas les propriétés de l'objet représenté. (...) Ils reproduisent certaines conditions de la perception de l'objet, mais après les avoir sélectionnées selon des codes de reconnaissance et les avoir notées selon des conventions graphiques*». Pour les IRM cérébrales, ces codes de reconnaissance correspondent aux protocoles d'acquisition et de traitement des données de résonances magnétiques, les conventions graphiques sont les choix de présentation de l'IRM (plan de coupe, signification des couleurs, etc.) et l'objet représenté est le cerveau.

On peut d'ailleurs remarquer que le cerveau en fonctionnement ne peut pas être perçu par l'œil tel qu'il est perçu par les techniques d'IRM, dont Eco compare la machinerie à une prothèse démultipliant-intrusive (Eco, 1997). L'imagerie par résonance magnétique transforme donc la réalité par une simplification, créant un nouvel objet afin la rendre visible et analysable (Jacobi, 1987).

Du point de vue de la sémiologie (Peirce, 1978), l'image scientifique est un signe impliquant des rapports triangulaires entre 3 pôles :

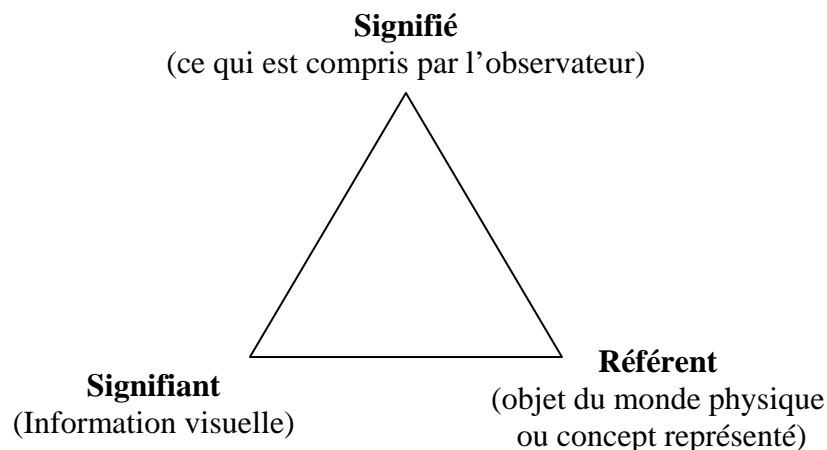


Figure 3 : triangle de Peirce

Pour une IRM fonctionnelle cérébrale visualisée avec *EDUANATOMIST* :

- **Le référent** est le cerveau en fonctionnement de l'individu considéré, dans les conditions associées au protocole d'acquisition des mesures.
- **Le signifiant** peut être rapporté à l'ensemble des pixels affichés sur l'écran correspondant aux 3 plans de coupes et aux repères et informations graphiques et alphanumériques qui l'accompagnent. Le fait que ce logiciel de visualisation permette de travailler avec le fichier

IRM volumique, complexifie le signifiant, qui inclue en fait trois collections d'images à 2 dimensions (les coupes transversales, sagittales et coronales) reliées entre elles dans un espace à 3 dimensions. Sur chaque coupe, un voxel est représenté par un pixel et les fonctions du logiciel permettent de faire varier les modalités et les codes de l'affichage de l'image. Dans son étude des images médicales, V. Mafféo (Mafféo, 2007) remarquait que le support à deux dimensions comprenait à la fois des éléments figuratifs (la forme du cerveau) et des signes graphiques (visualisation d'informations numériques codées) et plastiques (tâches et formes). Il en est de même des IRM visualisées avec *EDUANATOMIST*, qui se rapprochent des images graphiques ou conceptuelles telles que les cartes (Bertin, 1967). Elles sont d'ailleurs souvent nommées « cartes fonctionnelles ».

- **le signifié** dépendra donc à la fois des éléments du contexte de production connus de l'observateur, des codes graphiques choisis pour l'affichage du signifiant, de l'approche de l'observateur lui-même qui peut être plutôt figurative, conceptuelle, ou même esthétique et de l'objectif d'utilisation (diagnostic, recherche, enseignement).

Éduquer à l'image scientifique par l'exemple des IRM cérébrales, nécessitera donc de fournir aux élèves l'occasion de s'interroger sur les relations entre le référent, le signifiant et le signifié de ce type d'image, en n'omettant pas que le contexte d'utilisation des IRM pour l'enseignement n'est pas superposable au contexte d'investigation scientifique produisant ces images.

Évidemment, les signes peuvent prendre du sens en situation de communication. D'ailleurs, les images scientifiques ne sont pas simplement des illustrations, elles jouent un rôle structurant et organisateur dans les publications scientifiques, en liaison avec la partie matériel et méthodes (Jacobi, 1987). Les images IRM peuvent ainsi être considérées comme des « mobiles immuables » construits et sélectionnés par les chercheurs pour convaincre (Latour, 1985) car elles sont effectivement mobiles, immuables, présentables, lisibles et combinables et qu'elles ont un pouvoir important de conviction (McCabe et Castel, 2007). Ainsi, l'instauration de situations de communication entre élèves impliquant ces images pourraient peut-être permettre une meilleure appropriation de leur statut de modèle par les élèves.

II.3. Théorie des situations

La théorie des situations didactiques (Brousseau, 1998) propose un cadre pour appréhender les conditions de l'apprentissage de connaissances, savoirs et savoir-faire, dans les institutions de la société. Ayant analysé les contraintes s'exerçant sur l'enseignant et l'élève dans le système éducatif, elle présente une modélisation des situations d'enseignement qui permet de les analyser et d'affiner leur conception. Elle a été construite pour la didactique des mathématiques, mais est utilisée comme référence en didactique des sciences.

II.3.1. Contrat didactique

Comme toutes les relations interhumaines, la relation d'enseignement, surtout à l'intérieur d'une institution comme l'école, est sous-tendue par un contrat qui peut être plus ou moins implicite. Le contrat didactique est l'ensemble des comportements de l'élève attendus par l'enseignant et des comportements de l'enseignant attendus par l'élève en relation au savoir. Il dépend des contraintes de la société et de l'institution, et conditionne de manière importante l'apprentissage, dans les échanges d'informations et la répartition des tâches entre les élèves et l'enseignant.

II.3.2. Situation *adidactique* et milieu

Une situation *adidactique* est une situation liée à un enjeu de savoir, vécue par l'élève comme autonome. Dans ce type de situation, les intentions didactiques de l'enseignant ne sont pas perçues par l'élève comme venant du professeur, mais lui sont renvoyées par la situation elle-même. Ceci implique que l'élève ait pris en charge la responsabilité de trouver la solution du problème indépendamment du désir de l'enseignant, ce qui correspond à la *dévolution*.

Le milieu est alors défini comme le système antagoniste de l'élève dans la situation didactique (Brousseau, 1998). Il doit permettre à l'élève de construire un nouveau rapport à la connaissance par des feedbacks. Pour ce faire, la situation doit permettre à l'élève d'envisager une réponse de base, qui se révélera inefficace ou insuffisante. Il sera alors contraint de faire évoluer ses connaissances, en réalisant si besoin plusieurs tentatives. La connaissance visée sera *a priori* requise pour passer à une stratégie optimale et le milieu devra fournir des éléments de rétroaction permettant la validation.

Le travail de l'enseignant ou du chercheur, en amont de la séance, est donc de construire un milieu propice à l'apprentissage. Les éléments variables de la situation qui peuvent être fixés par le choix du professeur sont très intéressants s'ils ont une influence sur les stratégies de solutions élaborées par les élèves : ce sont des *variables didactiques* (Brousseau, 1982a). En agissant sur elles, l'enseignant pourrait provoquer des adaptations et des régulations, c'est-à-dire des apprentissages (Brousseau, 1982b). La conception de la situation et le choix des variables reposent alors sur une analyse *a priori* de la situation correspondant à un travail d'ingénierie didactique. (Brousseau, 1982b ; Artigue, 1988).

Notre travail s'inscrit dans cette démarche et aura donc pour but de concevoir une *situation* permettant aux élèves d'appréhender le statut des images IRM, en plaçant le logiciel *EDUANATOMIST* et certaines images IRM dans le milieu.

II.3.3. Situations didactiques, modélisation et démarche d'investigation

De nombreux travaux ont été consacrés à l'analyse de situations de classe au cours desquelles des élèves étaient engagés dans des activités de modélisation (Sanchez, 2008a). Certains de ces travaux ont conduit à l'élaboration d'ingénieries didactiques pour lesquelles les modèles pouvaient être élaborés ou utilisés par les élèves dans le cadre de l'étude de phénomènes biologiques ou géologiques (Sanchez, 2008b ; Sanchez, 2008c). Ainsi, pour l'apprentissage comme pour la recherche scientifique, il existe des liens étroits entre modélisation et résolution de problèmes. Les activités de création consistent à imaginer de nouvelles manières de concevoir ces systèmes et à prévoir l'existence de nouveaux aspects du réel. Les activités d'exploration consistent à utiliser des modèles conceptuels pour décrire, expliquer, prédire le comportement des systèmes (Halloun, 2004). Dans ce cas, les modèles présentés sous différentes formes, peuvent être considérés comme des éléments du milieu pour favoriser la représentation, la manipulation, la compréhension et la communication du phénomène étudié. Certaines caractéristiques sémiotiques du modèle fourni aux élèves représentent alors peut-être des variables didactiques.

Nous considérerons donc les images IRM, modèles de l'anatomie et du fonctionnement du cerveau comme des éléments du milieu à construire pour explorer les potentialités de ces représentations dans le cadre l'apprentissage des neurosciences. Le choix des IRM dans la banque *NEUROPEDA* pourra être envisagé comme une variable didactique potentielle et les manipulations des images réalisables avec *EDUANATOMIST* comme des actions offertes aux élèves pour élaborer des stratégies de résolution de problèmes.

III - PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESES DE RECHERCHE

III.1. Question de recherche

Nos interrogations portent sur l'utilisation pédagogique du logiciel *EDUANATOMIST* de visualisation d'IRM fonctionnelles issues de la banque de données *NEUROPEDA* dans un objectif d'éducation à l'image scientifique et numérique. La mobilisation des cadres théoriques décrits précédemment dans le contexte qui nous intéresse, nous conduit à reformuler nos questionnements de praticiens en proposant la problématique générale de recherche suivante :

Quels éléments prendre en compte dans une situation d'apprentissage utilisant *EDUANATOMIST* pour que les élèves envisagent les IRMf comme des modèles construits par les chercheurs ?

III.2. Hypothèses

Quatre hypothèses ont été formulées comme réponses possibles à la problématique posée :

- 1 : Les élèves peuvent réaliser certaines étapes de la construction d'une carte d'activation fonctionnelle en utilisant le logiciel *EDUANATOMIST*.
- 2 : Comprendre l'étape de traitement statistique des données d'IRMf nécessite la mobilisation de connaissances sur les traitements statistiques utilisés.
- 3 : Réaliser certaines étapes de la construction de la carte d'activation fonctionnelle permet aux élèves de se construire une représentation de l'IRMf comme résultant d'un travail de modélisation.
- 4 : Produire une carte d'activation fonctionnelle dans un but de communication avec des pairs pourrait permettre aux élèves de valider leurs stratégies de construction et de présentation de cette carte.

IV - METHODOLOGIE

IV.1. Construction d'une progression pédagogique pour l'éducation à l'IRMf

Les recherches présentées dans la partie bibliographique donnaient des pistes intéressantes concernant les obstacles repérables *a priori* pour la lecture et la compréhension d'IRMf. Des observations préliminaires de l'utilisation du logiciel *EDUANATOMIST* par les élèves, ont également été réalisées pour repérer d'éventuels obstacles, au cours de séances exploratoires en première S aux Lycées Vauvenargues d'Aix-en-Provence, dans la classe de Grégoire Molinatti et Pierre Brossolette de Villeurbanne, dans la classe de Michèle Gévaudan. Un échange avec Michel Dojat (neuroscientifique, IR INSERM, UJF Grenoble), a permis de préciser le vocabulaire à utiliser pour parler des différentes images IRM. La progression proposée a tenté de tenir compte de ces différents préalables. Elle a été conçue en collaboration avec Daniel Devallois, professeur de SVT qui l'a mise en œuvre dans sa classe, et Grégoire Molinatti, chercheur en Muséologie. Elle comprenait plusieurs activités préliminaires ainsi que la séance étudiée de façon approfondie dans ce mémoire.

IV.1.1. Activités préliminaires

Les activités insérées dans la progression avant la séance étudiée avaient pour but de faire découvrir aux élèves l'utilisation d'un Test statistique, de leur permettre d'explorer l'anatomie cérébrale, de les familiariser avec l'utilisation du logiciel *EDUANATOMIST* et de poser le problème étudié dans la séance suivante concernant l'IRMf.

IV.1.1.1. Utilisation d'un test statistique de Student

Comme il nous semblait que comprendre l'étape de traitement statistique des données d'IRMf nécessitait la mobilisation de connaissances sur la statistique (hypothèse 2), une première séance de travaux pratiques (2h) a été consacrée à la réalisation d'un test de Student pour déterminer la signification de la différence entre deux séries de mesures réalisées par les élèves. Elle a été conçue avec l'aide de Valérie Fontanieu, statisticienne à l'INRP, et Hélène Lample, professeur de mathématiques.

Pour déterminer si l'écoute de musique pouvait influencer le temps de réaction, les élèves ont utilisé le logiciel *Réaction*¹⁰ pour effectuer deux séries de 30 mesures de leur temps de réaction suite à l'apparition d'un stimulus visuel, dans le calme puis en écoutant de la musique. Les temps de réactions mesurés ont été saisis dans une feuille de calcul *EXCEL*, les moyennes ont été calculées pour les deux conditions et la question s'est posée de déterminer si l'écart entre les deux séries de mesures était significatif et permettait de conclure. Le principe du test de Student a alors été présenté aux élèves qui disposaient d'une feuille *EXCEL* permettant d'appliquer ce test à leurs propres mesures en faisant varier le risque de se tromper en affirmant que les deux séries ne sont pas significativement différentes. Le synopsis de la séance et les ressources utilisées sont présentées en annexe 1.

IV.1.1.2. Repérage anatomique avec le logiciel *EDUANATOMIST*

Pour familiariser les élèves à l'utilisation du logiciel *EDUANATOMIST* et leur permettre de prendre des repères concernant l'anatomie cérébrale, une activité d'une heure a consisté à visualiser une image anatomique, la superposer à un maillage 3D du cerveau pour orienter les 3 plans de coupes, puis repérer différents éléments anatomiques sur les coupes en faisant varier leurs coordonnées

¹⁰ Réaction, logiciel INRP créé par F. Tilquin, 2007,
<http://acces.inrp.fr/acces/vie/cerveau/sommeil/DossierScientifSommeil/index.html>

spatiales. Une fiche d'information reprenant le vocabulaire utilisé pour définir les coupes cérébrales et les principaux termes de l'anatomie encéphalique était disponible.

Les élèves devaient placer des repères d'orientation (avant, arrière...) en légende d'une figure reprenant l'écran du logiciel, et indiquer les coordonnées spatiales des structures repérées dans un tableau. Les fiches de consigne, de réponse et d'information correspondantes sont présentées en annexe 2.

Un des objectifs de cette activité était l'utilisation des outils de déplacement et de localisation dans l'espace proposés par le logiciel. En effet, lors des observations préliminaires, nous avons remarqué que certains élèves n'utilisent pas les curseurs de déplacement des plans de coupe. Ils ne modifient pas les coordonnées spatiales des images qu'ils visualisent, laissant toujours à l'écran les coupes affichées au départ, passant par le centre de la tête. Ce comportement devient un obstacle lorsque la zone active recherchée en IRMf ne se trouve pas dans les plans de visualisation par défaut qui s'affichent à l'ouverture de l'image, ce qui est souvent le cas. Les zones activées ne sont alors pas visibles sans une exploration de l'ensemble du volume cérébral.

IV.1.1.3. Élaboration d'hypothèses sur le fonctionnement du cerveau

Pour amorcer la *dévolution* du travail de recherche sur des IRMf de certaines zones actives du cerveau en relation avec la stimulation de certaines parties du corps, nous avons proposé aux élèves d'analyser un tableau d'observations cliniques d'altérations fonctionnelles en relation avec des lésions, permettant d'élaborer plusieurs hypothèses concernant le fonctionnement cérébral (voir annexe 3) :

- la régionalisation du fonctionnement cérébral (une région particulière du cerveau est impliquée dans une fonction particulière)
- l'inversion des projections cérébrales (les informations provenant de la partie droite du corps sont traitées par la partie gauche du cerveau et réciproquement)
- La plasticité cérébrale (suite à un traumatisme, certaines fonctions endommagées qui étaient prises en charge par une zone particulière peuvent être assurées par une nouvelle zone cérébrale)

Pour éviter la construction de conceptions réductrices concernant un localisationnisme fixiste des fonctions cérébrales (Molinatti, 2007), les symptômes causés par les traumatismes ont été accompagnés, sur le document fourni aux élèves, par des résultats concernant la récupération. Les travaux des élèves ont été mis en commun en début de la séance sur l'IRMf, et les hypothèses proposées ont motivé le travail de recherche réalisé.

IV.1.2. Séance de travail sur les IRM fonctionnelles

Les objectifs de la séance, son organisation et les éléments que nous avons tenté d'introduire dans le milieu sont décrits dans cette partie. Les différentes fiches de consignes et d'informations à disposition des élèves sont fournies dans l'annexe 4.

IV.1.2.1. Objectifs de la séance

Pour les élèves, le problème posé est celui de la localisation cérébrale du traitement des informations somato-sensorielles provenant de différentes parties du corps. Il s'agit de construire des cartes d'activation fonctionnelle permettant d'éprouver les hypothèses proposées, et de les utiliser pour communiquer entre les groupes puis en direction d'élèves n'ayant pas manipulé le logiciel.

IV.1.2.2. Utilisation d'un vocabulaire précis

Puisque l'IRM fonctionnelle est construite par une série d'étapes d'acquisition et de traitement des données (voir section IV.1.13), elle est la dernière image d'une série dont les significations sont chaque fois différentes. Nous avons donc choisi d'employer durant l'ensemble de la séance, un vocabulaire précis, construit à partir de celui utilisé par les spécialistes tels que Michel Dojat, que nous avons interrogé à ce sujet. Les dénominations utilisées par l'enseignant en classe durant ses interventions et dans les documents fournis aux élèves ont été les suivantes :

- **Images anatomiques** : pour les images anatomiques construites à partir des mesures RMN de relaxation des protons, après les étapes de traitement du signal et de réalignement spatial. Ces deux étapes n'ont pas été exposées précisément aux élèves.
- **Images brutes** : pour les images construites à partir des acquisitions fonctionnelles brutes, faisant correspondre à chaque voxel une valeur de mesure du signal bold (variation de débit sanguin cérébral).
- **Images brutes moyennées** : pour les images construites en moyennant les acquisitions brutes, faisant correspondre à chaque voxel la moyenne de plusieurs mesures du signal bold.
- **Cartes d'activation fonctionnelle** : pour les images obtenues après traitement statistique, faisant correspondre à chaque voxel une valeur de la statistique de test, exprimant la signification de la différence entre deux séries de mesures du signal bold réalisées en conditions différentes.

IV.1.2.3. Organisation de la séance

La séance s'est déroulée en 4 temps (voir Tableau 1) :

- la mise en commun du travail d'élaboration d'hypothèses réalisé à la maison (voir paragraphe III.1.12) qui a permis d'aboutir à un ensemble d'hypothèses que le travail sur les IRM fonctionnelles a pour but d'éprouver.
- la présentation par l'enseignant des principes de la construction d'IRMf et des fonctionnalités du logiciel *EDUANATOMIST* pour le traitement de ce type d'image. C'est à ce moment que le professeur fait le lien avec le test de Student réalisé la semaine précédente et explicite la signification de l'échelle de couleur, et la fonction de réglage des bornes d'affichage supérieure et inférieure.
- la construction dans *EDUANATOMIST*, par groupe de deux élèves d'une carte d'activation fonctionnelle faisant apparaître les zones cérébrales activées par la stimulation de deux zones corporelles, puis la présentation de cette carte sur une diapositive dans *POWERPOINT*.
- L'échange des diapositives entre deux groupes de deux élèves, suivi d'une collaboration pour la construction commune d'une nouvelle carte d'activation fonctionnelle faisant apparaître les régions cérébrales activées par la stimulation de 3 zones corporelles et destinée à des élèves n'ayant pas manipulé le logiciel.

Tableau 1 : organisation de la séance

	Activité	Dispositif de travail	Mode de communication
1	Discussion et élaboration d'hypothèses communes pour la classe	½ classe : le professeur + 16 élèves	Communication orale organisée par le professeur
2	Présentation des principes de l'IRMf et des fonctions d' <i>EDUANATOMIST</i>	½ classe : le professeur + 16 élèves	Diaporama explicité par le professeur Communication orale : questions/réponses
3	Construction et présentation d'une carte d'activation fonctionnelle	Par groupes de 2 élèves (8)	Communication orale directe entre les deux élèves
4	Collaboration pour la construction et la présentation d'une carte d'activation fonctionnelle plus complète	Pour 2 groupes de 2 élèves (4)	Communication orale directe entre les deux élèves d'un même groupe et clavardage par MSN entre deux groupes

IV.1.2.4. Nombre et nature des zones de stimulation étudiées

Le nombre et la nature des zones recherchées nous paraissent être des variables didactiques de la situation. En effet, le fait de travailler dès le départ sur deux zones de stimulation différentes devrait permettre aux élèves de repérer les différences de localisation des zones cérébrales correspondantes, mais aussi amener le problème de la différenciation de ces zones sur la carte, par le choix de palettes de couleurs différentes. On introduit alors dans la situation la nécessité de la légende. De plus, puisque *EDUANATOMIST* affiche toujours la même palette par défaut à l'ouverture d'un fichier IRMf, le choix des couleurs reviendra alors aux élèves, ce qui leur permettra peut-être de construire plus facilement ce statut de convention des couleurs choisies.

Par ailleurs, une des zones étudiées lors du travail par binôme est identique pour les deux groupes collaborant, les deux autres sont différentes. Ainsi, les deux groupes vont pouvoir comparer leurs résultats pour des éléments communs et vont devoir collaborer pour ajouter une nouvelle zone étudiée par l'autre à leur propre carte. Ces deux types d'interactions devraient favoriser la communication autour des choix réalisés lors de la construction de la carte d'activation fonctionnelle, et à propos des informations nécessaires pour comprendre et utiliser cette carte. Les zones de stimulation à étudier ont donc été imposées pour chaque groupe de deux élèves, de manière à réaliser ces conditions.

IV.1.2.5. Tâches de construction d'une carte d'activation fonctionnelle

Comme nous l'avons vu plus haut (section II.13), une carte d'activation fonctionnelle est une modélisation, résultant d'un nombre important d'étapes de mesure, traitement et présentation des données. Évidemment, les élèves ne peuvent réaliser l'acquisition des mesures en classe, mais on peut leur demander de choisir entre différents fichiers-images correspondant à différentes étapes d'acquisition ou de traitement des données, puis de paramétrer leur affichage avec *EDUANATOMIST* pour construire des cartes.

Les étapes que nous avons laissées réaliser aux élèves sont présentées ci-dessous. Elles ont été choisies en relation avec les hypothèses (1) (2), parce qu'elles nous semblaient intervenir de façon majeure dans la signification des IRMf et être réalisables dans les conditions étudiées.

- Le choix des fichiers IRM à utiliser

Pour visualiser sur un même plan de coupe du cerveau les régions activées spécifiquement lors de la stimulation de deux zones du corps différentes, il est intéressant de superposer les deux cartes d'activation fonctionnelle correspondantes à une image anatomique du même individu, qui renseignera sur la localisation anatomique précise des régions observées.

La variabilité interindividuelle étant une propriété importante du cerveau mise en évidence par l'IRM, il nous a paru important de laisser les élèves choisir quelle image anatomique ils allaient superposer à leurs cartes fonctionnelle. Nous avons donc mis leur disposition des images anatomiques concernant 2 individus différents.

La compréhension du protocole soustractif de construction des IRMf, soutenant la recherche des régions dont l'irrigation sanguine est significativement supérieure en cas de stimulation par rapport à l'absence de stimulation nous paraissait être capitale pour la compréhension de la signification des IRMf. Nous avons donc proposé aux élèves un choix de fichiers IRM comprenant des images brutes (dans une seule condition, sans comparaison) et des cartes d'activations fonctionnelles (résultats du test statistique sur la comparaison entre les deux conditions). Ces images n'étaient disponibles que pour une zone de stimulation (index droit), que tous les groupes d'élèves ont eu à étudier. Cependant, l'expérimentation réalisée avec la première demi-classe nous a montré que nous avons fortement sous évalué le temps nécessaire aux élèves pour réaliser ce choix (voir la partie résultats : VI-11). Les images brutes ont donc été retirées du lot de fichiers disponibles pour la deuxième demi-classe. Seuls restaient à choisir les zones stimulées et les individus testés.

- Le réglage des bornes d'affichage des voxels

Lorsque l'on ouvre un fichier IRMf avec *EDUANATOMIST*, une échelle de couleur s'affiche dans la fenêtre de contrôle, correspondant à la signification statistique de la différence d'irrigation du cerveau entre les conditions *ON* et *OFF* (voir Annexe 2D). Pour chaque voxel, plus la couleur affichée correspond à une valeur élevée, plus la différence entre les deux conditions de mesure est statistiquement significative. Les valeurs affichées sont comprises entre 0 et 100, représentant en première approximation une échelle de confiance dans le résultat affiché. La valeur de confiance associée à chaque voxel, nous paraît cependant très approximative, car il nous a été impossible de déterminer précisément comment elle était calculée. En effet, dans les fichiers utilisés par le logiciel professionnel *Anatomist*, dont est issu *EDUANATOMIST*, les valeurs affectées à chaque voxel sont les statistiques du Test de Student calculées. L'affichage a été « simplifié » par les concepteurs d'*EDUANATOMIST* en une échelle variant de 0 à 100, vraisemblablement par un traitement linéaire, mais dont nous n'avons pas connaissance. Comme la relation entre la valeur de la statistique de Test, et le degré de confiance (c'est-à-dire la probabilité de ne pas se tromper) accordée à la différence suit la fonction de Student qui n'est pas linéaire, on peut craindre que la valeur affichée ne corresponde pas réellement à un seuil de confiance calculé.

La relation entre les valeurs associées à l'échelle de couleur et les statistiques de test a été explicitée par le professeur en début de séance. Il a fait retrouver aux élèves que plus la statistique de test était élevée, plus la différence entre les deux séries de mesures étudiées était significative. Il a aussi précisé que les valeurs de l'échelle colorée variaient dans le même sens que la statistique de test : plus elles sont élevées, plus la différence entre les deux conditions est significative pour le voxel étudié.

Le logiciel *EDUANATOMIST* offre la possibilité de choisir les bornes d'affichage pour chaque IRMf : seuls les voxels dont les valeurs sont comprises entre ces bornes apparaissent alors sur l'écran, et l'échelle de couleur est redistribuée automatiquement entre les bornes supérieure et inférieure choisies. Lors de l'ouverture d'une image, la borne inférieure est réglée par défaut à 32 et la borne supérieure à 95. Pour localiser précisément les régions cérébrales spécifiquement actives lors d'une stimulation, il faut donc régler la borne supérieure à 100, et donner à la borne inférieure une valeur élevée (les informations disponibles dans la banque *NEUROPEDA*, construites avec des chercheurs, indiquent une valeur de 80 pour la borne inférieure). La signification de ces réglages a été expliquée par l'enseignant en début de séance, mais aucune valeur de référence n'a été donnée. Le choix des bornes était entièrement laissé à la charge des élèves, ce qui permettait de tester une part de l'hypothèse 1 et l'hypothèse 2.

- La sélection du ou des plans de coupe

Pour localiser les régions cérébrales spécifiquement activées par une stimulation, il faut avoir superposé la carte fonctionnelle à l'anatomie du même sujet, puis explorer l'ensemble du volume cérébral à la recherche des zones les plus colorées en utilisant les outils de déplacement des plans de coupes et de correspondance spatiale. Cette tâche était également à la charge des élèves, qui avaient déjà utilisé les mêmes outils lors de l'activité précédente de repérage anatomique. On peut noter ici qu'un plan de coupe est alors défini précisément par son nom (coupe coronale, sagittale ou transversale) accompagné d'une coordonnée spatiale, qui s'inscrit en haut de chaque coupe sur l'interface (voir Annexe 2D).

- Le choix des palettes de couleurs

Si l'on veut faire figurer des régions cérébrales correspondant à différentes stimulations sur la même carte, leur différenciation implique de les afficher dans des palettes de couleurs différentes. Le logiciel *EDUANATOMIST* offre différentes palettes, parmi lesquelles les élèves pouvaient choisir.

Des indications ont été données par le professeur en début de séance concernant le protocole de modification de la palette d'une carte. Elles étaient reprises dans la fiche technique disponible (voir Annexe 2D).

IV.1.2.6. Tâches de présentation de la carte d'activation fonctionnelle

Pour permettre aux élèves de mettre en relation le signifiant et le signifié de leur carte d'activation fonctionnelle, et lui donner toute sa valeur d'image scientifique, nous avons intégré à la situation une dimension de communication à distance (par l'écrit). En effet, l'image signifiante doit porter avec elle les informations pour être comprise et utilisée par d'autres. Il paraissait donc intéressant de placer les élèves en situation d'utiliser une image produite par d'autres sans pouvoir parler directement avec eux. Les informations non précisées deviendraient nécessaires, lorsqu'elles manqueraient pour comprendre l'image ou pour l'interpréter. L'apprentissage pourrait alors se construire en interaction avec les autres, dans une approche socio-constructiviste.

Les coupes cérébrales intéressantes obtenues lors de la construction de la carte d'activation fonctionnelle ont donc été enregistrées par les élèves sous forme de 3 images au format *jpeg* générées par *EDUANATOMIST*. Elles ont été insérées dans une présentation *POWERPOINT*, pour débiter un travail collaboratif en communiquant par l'intermédiaire de MSN. Nous n'avons pas pu obtenir deux salles différentes comme nous l'avions envisagé au départ, mais nous avons demandé aux élèves de jouer le jeu de la communication par clavardage, sans autres interactions verbales ou non.

Le but du travail collaboratif entre deux groupes présentait à nouveau un objectif communicationnel : construire une carte d'activation fonctionnelle où apparaissent les régions cérébrales correspondant à 3 zones corporelles de stimulation différentes et destinée à être publiée sur le site internet du Lycée. L'image scientifique produite devait donc être compréhensible par des pairs n'ayant pas manipulé d'IRMf.

Cet ensemble de tâches est en relation avec notre hypothèse 4 : nous supposons que c'est en communiquant sur l'image (et en adaptant cette communication aux connaissances supposées de son interlocuteur potentiel ou réel), que l'élève sélectionne et explicite des informations épistémologiques et sémiotiques concernant l'image. Il est alors en situation de faire le travail métacognitif sur ce que représente réellement l'image.

IV.1.2.7. Éléments du milieu fournissant des aides et des informations

Outre les éléments de la situation conçus pour favoriser les interactions entre les groupes à propos des cartes fonctionnelles, de leur construction et de leur signification, les ressources suivantes étaient disponibles sous formes de fiches imprimées ou visualisables sur les ordinateurs :

- Un tableau d'informations sur les fichiers IRM disponibles (voir annexe 4C) reprenant les types d'images, les protocoles d'obtention et de traitement des données correspondantes et la signification de l'échelle de couleur associée.
- Une fiche technique (voir annexe 2D) : décrivant les différents outils du logiciel et précisant à quoi correspond le réglage des seuils pour les différents types d'image (contraste pour les images anatomiques, seuils inférieur et supérieur d'importance de l'irrigation pour les images fonctionnelles brutes, seuils inférieur et supérieur de signification statistique de la différence pour les cartes d'acquisition).
- La fiche d'information et de vocabulaire concernant l'anatomie déjà utilisée lors de l'activité de repérage anatomique (voir annexe 2C).
- Une fiche de consignes (annexe 4B) explicitant les tâches à effectuer qui avaient été présentées par le professeur en début de séance.

IV.2. Recueil des données

Le corpus étudié dans ce mémoire est constitué de productions réalisées par les élèves, et de traces partielles de leurs activités.

L'expérimentation a eu lieu sur deux semaines dans une classe de 32 élèves de première S du Lycée Madame de Staël de Saint-Julien-en-Genevois, et a été animée par le professeur de la classe, Daniel Devallois. La classe était dédoublée en deux groupes de 16 élèves pour les travaux pratiques. Nous avons demandé aux élèves de maintenir leurs associations par deux durant les différentes séances.

IV.2.1. Activités préliminaires

En ce qui concerne les activités préliminaires, seule la séance d'utilisation du test statistique pour évaluer la signification de la différence entre deux séries de mesures a été étudiée. Les traces retenues dans le corpus sont les fichiers *EXCEL* des élèves comprenant les mesures, les calculs réalisés sur ces mesures, et les réponses aux questions posées.

IV.2.2. Séance de travail sur les IRMf

Comme le logiciel *EDUANATOMIST* ne trace pas l'activité des élèves, nous avons sauvegardé manuellement le résultat du travail de construction de la carte pour les 8 groupes de deux élèves de chaque demi-classe, en capturant l'écran via la combinaison de touches « Alt-imprime écran » pour enregistrer la fenêtre de visualisation des coupes, et la fenêtre de paramétrage de chaque fichier IRM afin d'avoir les réglages du contraste et des bornes d'affichage. Il faut remarquer que cette sauvegarde n'a eu lieu qu'une seule fois, lorsque les élèves ont eux-mêmes sauvegardé leurs cartes pour les insérer dans leur diaporama. Les modifications qui ont été réalisées ensuite, au niveau du groupe de deux, ou suite à la communication avec l'autre groupe n'ont pas pu être sauvegardées de cette façon.

Les présentations *POWERPOINT* produites ont été sauvegardées sur chaque ordinateur par les élèves et récupérées en fin de séance. Notre demande de sauvegarder les modifications sous forme de versions successives n'a en général pas été suivie par les élèves, qui avaient déjà beaucoup à faire. Le plus souvent, le fichier que nous possédons pour analyse est donc la dernière version réalisée, les versions plus anciennes ayant été écrasées. Dans un seul cas la présentation issue du travail collaboratif des deux groupes a eu le temps d'être enregistrée sous un nouveau nom.

Les élèves se sont connectés à MSN en utilisant leurs identifiants personnels. La majorité d'entre eux maîtrisait bien cet outil de communication. Les interactions MSN, (clavardages) ont été sauvegardées pour chaque séquence de collaboration entre groupe. Elles présentent des communications directement écrites, précisant les noms des interlocuteurs, repérant les échanges de fichiers, et donnant des repères temporels précis, ce qui a l'avantage d'éviter l'étape de transcription. Par contre, elles identifient les deux élèves d'un même groupe à un seul locuteur. On ne peut pas savoir s'ils étaient d'accord, ni lequel des deux s'exprimait.

IV.3. Traitement du corpus

Les indicateurs recherchés dans les traces et les grilles d'analyse construites *a priori* sont présentées en fonction des hypothèses formulées.

IV.3.1. Hypothèse 1

Les élèves peuvent réaliser certaines étapes de la construction d'une carte d'activation fonctionnelle en utilisant le logiciel *EDUANATOMIST*

Pour appréhender les étapes de construction de la carte d'activation fonctionnelle effectivement réalisées par les groupes de deux élèves, nous avons analysé les copies d'écran que nous avons enregistrées. Nous avons porté notre attention plus particulièrement sur le choix des fichiers IRM, les valeurs des bornes d'affichage et les coordonnées spatiales retenues.

Pour interpréter ces données, il faut tenir compte de l'état des réglages par défaut apparaissant à l'ouverture des images (tableau 2) et des réglages pertinents. Le tableau 3 présente les valeurs correspondant aux coordonnées spatiales permettant de voir au moins un pixel de la région recherchée pour des bornes d'affichage¹¹ comprise entre 70 et 100. Les ressources pédagogiques de la banque *NEUROPEDA*, rédigées à partir des informations provenant des auteurs des images, indiquent plutôt de régler les bornes d'affichage à 80 et 100, ce qui correspond aux seuils choisis pour une publication scientifique. Comme aucune information à ce propos n'était donnée aux élèves, nous avons considéré que la valeur 70 était encore acceptable pour la borne inférieure. Le tableau 4 présente les coordonnées permettant de visualiser simultanément deux régions cérébrales activées par deux stimulations différentes.

Tableau 2 : « Préréglages » apparaissant à l'ouverture de l'image

Fichier image	Coordonnées axiales	Coordonnées sagittales	Coordonnées coronales	Réglages des curseurs (signification de l'échelle)
Image anatomie	91	91	109	0-30 (contraste)
Image brute	91	91	109	32-95 (signal BOLD, irrigation)
Carte d'activation fonctionnelle	91	91	109	32-95 (signification statistique)

Lorsque l'image anatomique est réglée sur d'autres coordonnées spatiales, l'ouverture d'un fichier correspondant à une image brute ou à une carte d'activation fonctionnelle ré-initialise les coordonnées spatiales sur les valeurs par défaut codées dans le logiciel (91, 91, 109).

Tableau 3 : coordonnées spatiales permettant de visualiser au moins 1 pixel de la région cérébrale spécifiquement activée lors de la stimulation de différentes zones du corps (Pour des bornes d'affichages réglées entre 70 et 100)

Zone étudiée	Coordonnées axiales	Coordonnées sagittales	Coordonnées coronales
Index droit	33-54	120-137	104-126
langue	58-86	30-55 et 133-154	91-117
Pied droit	26-35	95-114	135-146
Auriculaire droit	33- 52	120-138	104-124

Tableau 4 : Possibilités d'afficher les 2 zones recherchées sur la même coupe

Index +	Coupe axiale	Coupe sagittale	Coupe coronale
langue	-	133-137	104-117
Pied droit	-	-	-
Auriculaire droit	33-52	120-137	104-124

On voit que les zones activées par la stimulation de l'index et de l'auriculaire droits sont visualisables ensemble dans les 3 plans de coupe et que celles correspondant à l'index et la langue peuvent être affichées ensemble en coupe sagittale et coronale. Par contre les zones correspondant à la stimulation de l'index et du pied droit ne peuvent pas être vues sur la même coupe. Il faudra afficher deux images différentes pour les observer. Les groupes qui devaient construire une

¹¹ Bornes d'affichage : seuls les pixels correspondant à des voxels pour lesquels les valeurs de signification statistique de la différence entre les essais ON et OFF sont comprises entre celle de la borne inférieure et celle de la borne supérieure sont colorés.

représentation présentant les régions cérébrales concernant le pied et l'index droit avaient donc une tâche plus difficile à réaliser que les autres.

Pour les différents indicateurs, nous nous sommes posé les questions suivantes :

- Le choix des fichiers IRM utilisés permettait-il de répondre à la question posée ?

Si oui, l'IRM anatomique affichée correspondait au même individu que les IRM fonctionnelles, qui devaient correspondre à des cartes d'activation après traitement statistique.

- Le réglage des bornes d'affichage assurait-il effectivement la visualisation des régions correspondant à une activation spécifique ?

Si oui, la borne supérieure était réglée sur 100 et la borne inférieure présentait une valeur élevée supérieure à 70.

- les coordonnées spatiales retenues: permettaient-elles de visualiser les régions cérébrales recherchées ?

Si oui, les valeurs des coordonnées spatiales étaient comprises dans les intervalles présentés dans le tableau 3. La grille rassemblant ces indicateurs est présentée en annexe 5.

IV.3.2. Hypothèse 2

Comprendre l'étape de traitement statistique des données d'IRMf nécessite la mobilisation de connaissances sur la statistique

Les feuilles de calcul *EXCEL* réalisées par les élèves lors de la première séance et leurs réponses aux questions posées ont été analysées pour déterminer :

- si le test statistique avait été correctement réalisé (valeur obtenue et indiquée en réponse cohérente avec les mesures effectuées) ;
- si les résultats du test statistique étaient correctement interprétés ;
- quel registre linguistique était choisi pour exprimer la notion de risque ou de confiance associée au test ;
- quels éléments étaient mobilisés pour l'argumentation de la conclusion.

Ces éléments de compréhension du test statistique ont ensuite été mis en relation avec le réglage des bornes d'affichage.

IV.3.3. Hypothèse 3

Réaliser certaines étapes de la construction de la carte d'activation fonctionnelle permet de construire une représentation de l'IRMf comme une modélisation

Pour rechercher quelles étapes de la construction ont été significatives pour les élèves, nous avons :

- analysé le titre et les légendes produits dans la présentation *POWERPOINT*, en observant notamment quelles étapes de la construction de l'image ont été indiquées par les élèves
- recherché quelles étapes de construction de la carte apparaissaient durant les clavardages et dans les réponses à la question 2 sur les hypothèses.

IV.3.4. Hypothèse 4

Produire une carte d'activation fonctionnelle dans un but de communication avec des pairs pourrait permettre aux élèves de valider leurs stratégies de construction et de présentation de cette carte

Pour explorer cette hypothèse, nous avons recherché dans les historiques MSN, l'argumentation développée par les élèves pour décider des modifications des cartes ou de leur présentation, ainsi que d'éventuelles modifications du lexique et des arguments. Quand cela était possible, nous avons aussi comparé la production finale de deux binômes associés avec les productions préliminaires de chacun d'eux, et analysé de façon concomitante les historiques MSN et les présentations *POWERPOINT* pour tenter de reconstituer les modifications non sauvegardées. Enfin, nous avons repéré dans les réponses aux questions 1 et surtout 2, les allusions aux travaux réalisés par l'autre groupe et leurs objectifs. La pertinence des arguments développés a été évaluée. Nous nous sommes aussi intéressés au choix des palettes de couleurs pour les deux fichiers considérés.

V - RESULTATS

V.1. Réalisation des étapes de construction de la carte par les élèves

Hypothèse 1 : Les élèves peuvent réaliser certaines étapes de la construction d'une carte d'activation fonctionnelle en utilisant le logiciel *EDUANATOMIST*.

V.1.1. Choix des fichiers IRM

Les fichiers IRM disponibles pour le groupe A étaient plus nombreux que pour le groupe B. Ils incluaient des images brutes en condition *ON* ou *OFF* pour la stimulation de l'index (voir tableau fourni aux élèves en annexe 4C). La Figure 4 montre que les élèves de ce groupe A ont passé presque tout leur temps de travail sur le choix des fichiers, le traitement et la construction de la présentation, et qu'il ne leur est pratiquement pas resté de temps pour la communication entre les binômes.

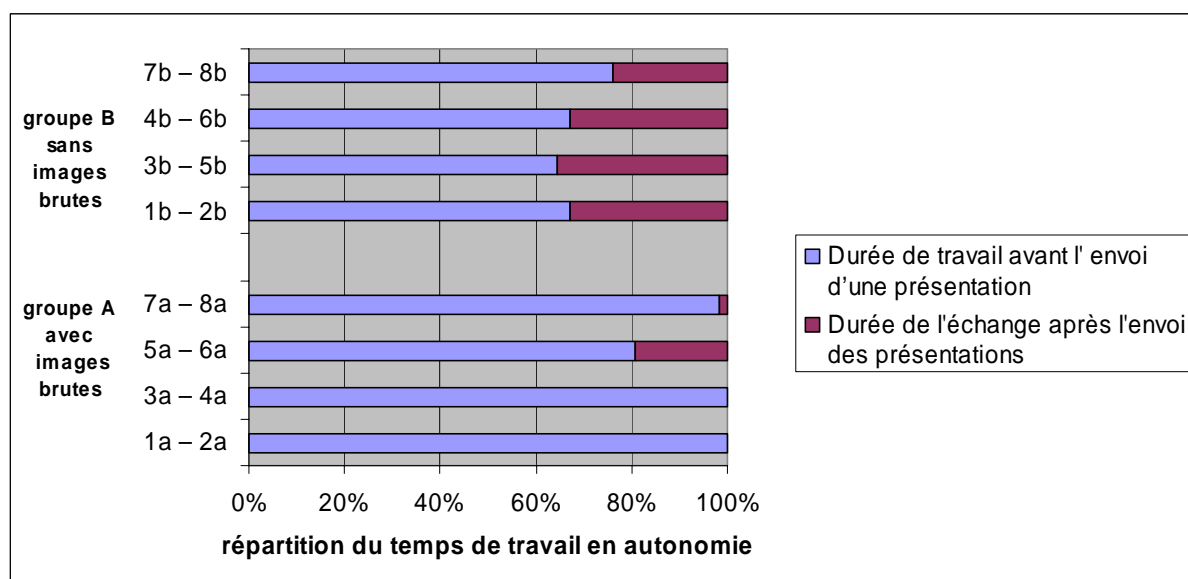


Figure 4 : répartition du temps de travail en autonomie pour les différentes associations de binômes

Durant la séance, nous avons remarqué que beaucoup d'élèves du groupe A choisissaient les images brutes d'acquisition du signal Bold en condition *ON* ou *OFF* concernant la stimulation de l'index. Les fichiers correspondant se situant en haut du tableau d'information (annexe 4C), ils représentaient les premiers fichiers disponibles concernant l'index, et on peut penser qu'ils ont été retenus pour cette raison. Un seul binôme a affiché les acquisitions brutes *ON* et *OFF*, dans le but de les comparer et s'est rendu compte que c'était très difficile. Nous sommes intervenus pour au moins quatre binômes sur huit en proposant aux élèves de reconsidérer leur choix.

Les difficultés de choix des images nous ont paru si importantes, que les images brutes *ON* et *OFF* ainsi que l'image brute moyennée ont été éliminées pour le groupe B.

Par contre, le choix d'afficher l'image anatomique correspondant au même individu que l'image fonctionnelle et celui de superposer les deux cartes fonctionnelles pour pouvoir comparer les régions activées par la stimulation de deux zones différentes sont des tâches qui ont été réalisées par la quasi-totalité des groupes (Figure 5). Seuls deux binômes sur 15 n'ont pas superposé les images fonctionnelles à une image anatomique. Ces tâches semblent donc tout à fait réalisables par des élèves de 1^{er}S.

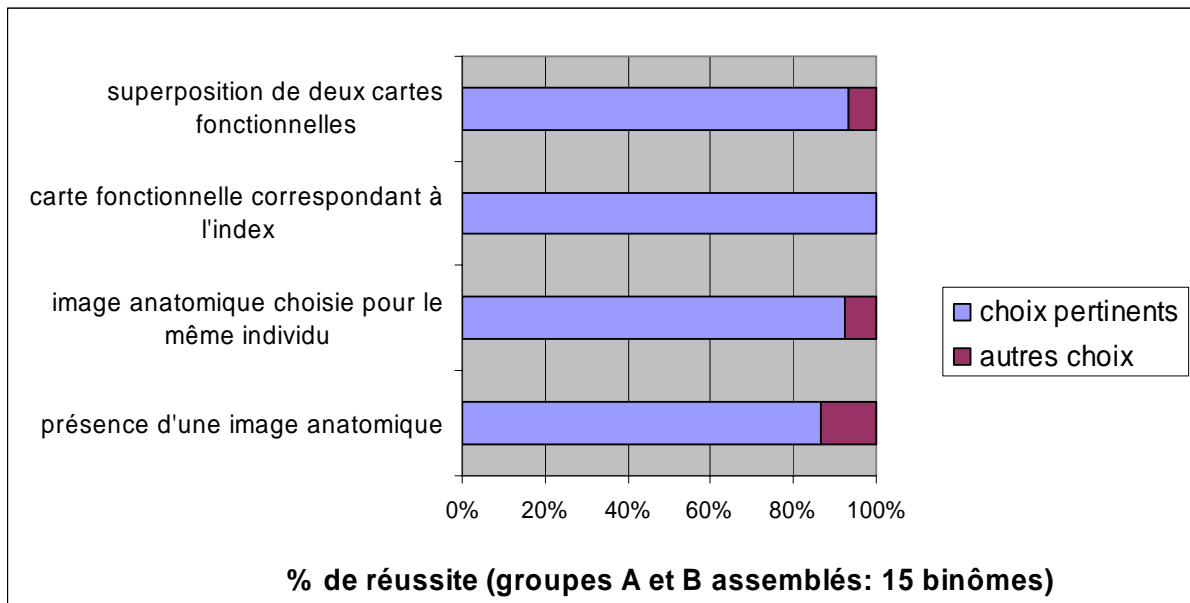


Figure 5 : Taux de réussite des élèves pour les tâches de sélections des fichiers IRM

V.1.2. Choix des bornes d’affichage

Les Figure 6 à Figure 9 présentent la répartition des valeurs choisies par les binômes des deux groupes pour les bornes d’affichage supérieure et inférieure, au moment de la réalisation des copies d’écran des images construites par les élèves.

On peut voir sur la Figure 6 que la valeur 100 a été majoritairement choisie pour la borne supérieure (20/28 réglages soit 71% des cas), ce qui laisse penser que sa signification a été assez bien comprise. Les choix dans l’intervalle [90, 99] correspondent principalement à la valeur 95 qui s’affiche par défaut à l’ouverture de l’image. Ils correspondent donc plus vraisemblablement à une absence de réglage de la borne supérieure qu’à un choix délibéré. On constate tout de même que plusieurs groupes ont utilisé des valeurs faibles, ce qui montre qu’ils n’ont pas compris la signification de ce réglage. Ils représentent 4 binômes sur les 17 dont nous avons pu garder la trace.

En ce qui concerne le réglage de la borne d’affichage inférieure (Figure 7), on observe une plus grande variabilité dans l’ensemble des choix des élèves. L’effectif le plus important concerne des valeurs entre 30 et 39, qui sont proches de la valeur 32 qui s’affiche par défaut. On peut donc voir que la majorité des groupes ont choisi des valeurs faibles, qui permettent de voir de grandes plages colorées sur l’image, mais ne conviennent pas pour observer les régions significativement activées lors de la stimulation de la zone étudiée. Les valeurs comprises entre 70 et 80, que nous considérons comme pertinentes, ont été sélectionnées seulement pour 8/28 réglages soit 28%, ce qui correspond à 3 binômes sur les 17.

Comme le montre la Figure 8, les valeurs des bornes d’affichage ont été fortement modifiées par les élèves, et le réglage de la borne inférieure a été moins pertinent que celui de la borne supérieure. On peut donc penser que les élèves n’ont pas compris la signification de ce réglage, et qu’il a été un obstacle pour eux. En effet, plus la valeur de la borne inférieure est faible, plus la surface des zones colorées est importante sur les images, et plus on peut facilement croire avoir réussi. Il semble cependant que dans le groupe B, où plus de temps a été disponible pour ce travail, les résultats soient meilleurs (Figure 9). Pour 3 binômes, ce réglage est amélioré pour la deuxième image par rapport à la première, et les valeurs choisies pour la borne inférieure ne sont jamais plus faibles pour la deuxième image. Cette remarque est en faveur de l’importance du temps disponible pour cette réflexion.

En ce qui concerne la corrélation entre les 2 images fonctionnelles, les bornes choisies pour l'affichage sont identiques seulement pour 2 /7 binômes du groupe A et dans 5/7 des cas pour le groupe B. On peut donc penser qu'avec plus de temps, les élèves du groupe B ont pu décider d'homogénéiser leurs réglages pour les deux images observées.

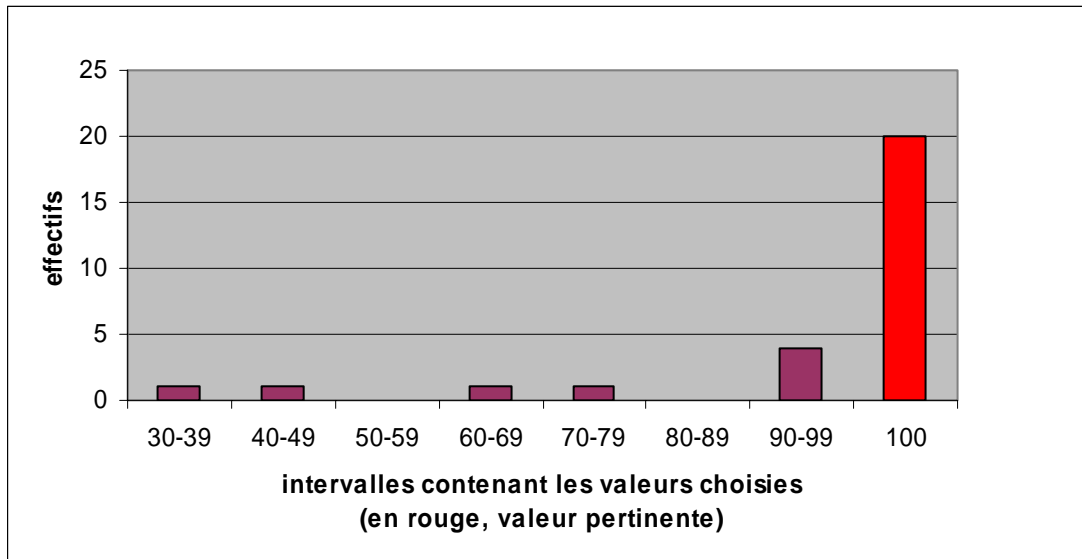


Figure 6 : valeurs choisies pour la borne supérieure (en rouge, valeur pertinente)

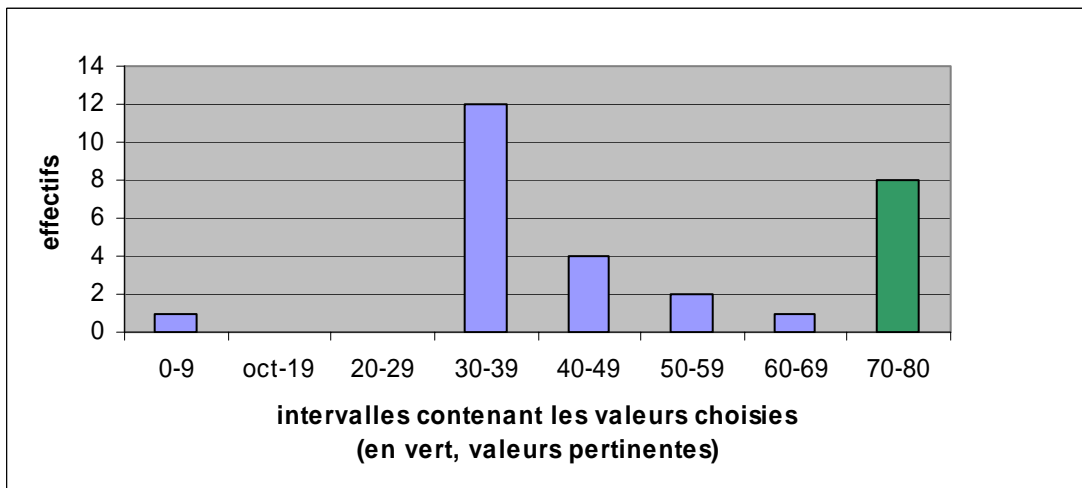


Figure 7 : valeurs choisies pour la borne inférieure (en vert, valeurs pertinentes)

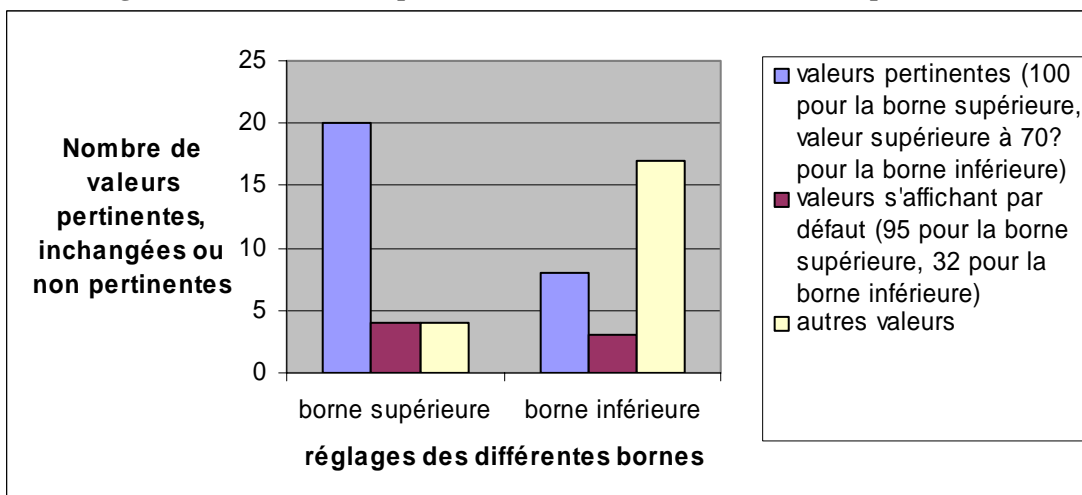


Figure 8 : Réglage des bornes d'affichage

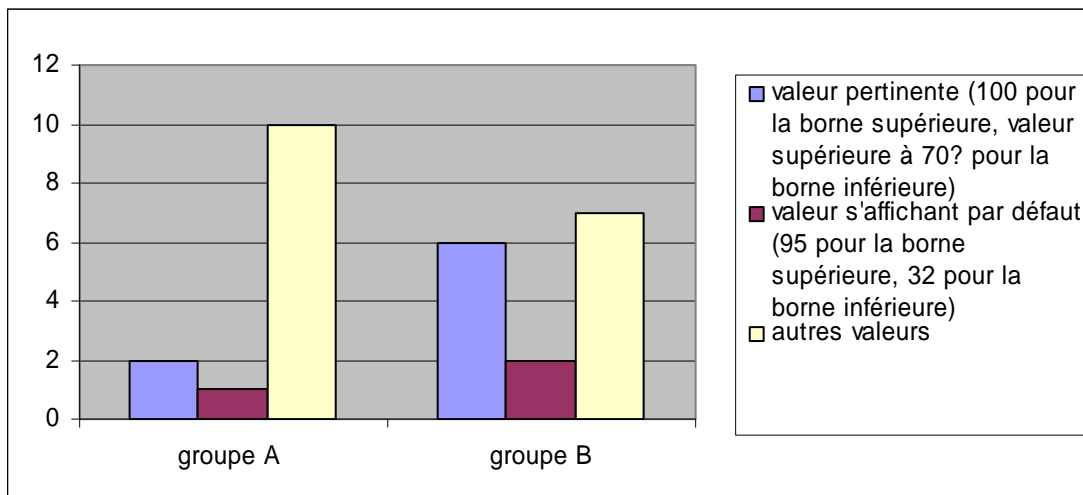


Figure 9 : Comparaison du réglage de la borne inférieure pour les groupes A et B

V.1.3. Choix des coordonnées spatiales

V.1.3.1. Modification des coordonnées spatiales par les élèves

La Figure 10 montre les taux de modification des coordonnées spatiales (nombre de modifications / nombre total de binômes) pour chaque coupe proposée par le logiciel.

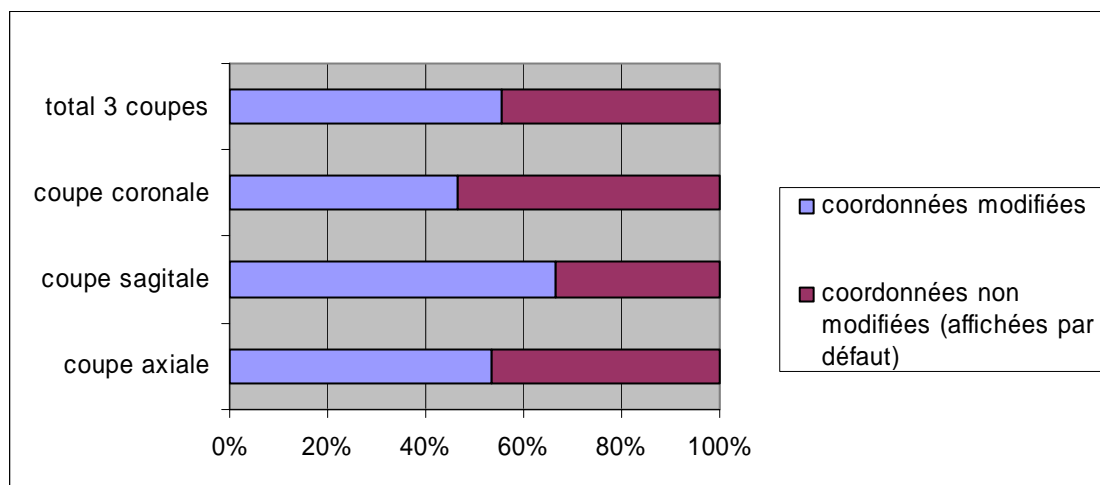


Figure 10 : Taux de modification des coordonnées spatiales

On peut voir que dans le meilleur cas, pour la coupe sagittale, 67% des coordonnées ont été modifiées. En moyenne, pour les 3 coupes, seulement 56% ont été changées. Cinq groupes sur les 17 dont nous avons gardé les traces n'ont modifié aucune des coordonnées spatiales, c'est-à-dire qu'ils n'ont pas cherché les régions du cerveau activées en dehors des plans de coupes qui s'affichent par défaut à l'ouverture du fichier. Plusieurs interprétations peuvent expliquer ce résultat. En se plaçant du point de vue des fonctionnalités du logiciel, on peut supposer que les élèves ne maîtrisaient pas les outils de variation des coordonnées spatiales, et ne les ont pas utilisés. On pourrait aussi penser que pour ces élèves, la représentation spatiale du cerveau, ne s'était pas construite en 3 dimensions, puisque la « profondeur » de chaque coupe n'a pas été explorée. Ceci constituerait alors un obstacle important pour le travail sur les cartes fonctionnelles, obstacle qui se serait maintenu malgré la séance de travail sur l'anatomie cérébrale proposée en activité

préliminaire. Pour mieux comprendre ce résultat, il faut aussi tenir compte de « l'emboîtement » des tâches proposées aux élèves. En effet, si les bornes d'affichage relatives à la signification statistique sont réglées de manière incorrecte, sur un intervalle très large par exemple, ou avec une valeur faible pour la borne supérieure, la surface des tâches colorées apparaissant sur les coupes devient importante, et l'on peut facilement croire avoir trouvé une zone intéressante, sans même faire varier les coordonnées spatiales. Le tableau 5 présente les choix des bornes d'affichages pour les 5 binômes ayant gardé les coordonnées s'affichant par défaut.

Tableau 5 : Choix des bornes d'affichage pour les binômes n'ayant pas modifiés les coordonnées spatiales

Binômes	4A	1B	2B	3 B	8 B
Réglage des bornes d'affichage de la carte 1 (borne inférieure – borne supérieure)	30-63	70-100	32-100	49-100	30-100
Réglage des bornes d'affichage de la carte 2 (borne inférieure – borne supérieure)	33-47	70-100	32-100	75-100	30-100

On peut voir que l'un d'entre eux (4A) a choisi une borne supérieure trop faible. Il avait donc éliminé l'affichage des zones spécifiques, et voyait à l'écran de nombreuses zones non spécifiques colorées, dont il s'est satisfait (Figure 11). Les groupes 2B, 3B et 8B ont choisi un intervalle d'affichage très grand qui implique la visualisation de nombreuses zones non spécifiques. Cependant, comme leur borne supérieure était réglée à 100, les zones spécifiques auraient pu être visibles car elles correspondaient aux voxels de valeurs les plus élevées, représentées par des couleurs chaudes (jaune, rouge). On peut donc penser que ces élèves n'ont pas compris soit l'étape de traitement statistique, soit la signification du code couleur, ou encore l'utilisation des outils de déplacement. Enfin, le groupe 1B, dont l'intervalle d'affichage permet de visualiser essentiellement des zones spécifiques, s'est satisfait des coupes affichées par défaut, car les zones spécifiques de la langue apparaissent sur la coupe coronale affichée par défaut à l'ouverture du fichier. La coupe axiale montre des zones «bleues» qui ont pu être interprétées comme spécifiques, même si elles ne correspondent pas aux zones les plus significativement différentes, qui elles sont colorées en rouge (Figure 12).

On met ici en évidence l'obstacle de la signification de la gradation de l'échelle de couleur (de bleu à rouge), ainsi que la difficulté de faire correspondre entre elles les coupes pour une visualisation dans l'espace. En effet, en utilisant l'outil de positionnement pour cliquer sur la zone la plus colorée de la coupe coronale, les élèves auraient pu retrouver les zones correspondantes sur les coupes axiale et sagittale, ce qui n'a pas été fait. Cet outil, qui repose sur la corrélation entre les coupes de chaque plan en un point, est précieux pour visualiser les correspondances entre les 3 plans de coupe mais il n'a pas souvent été utilisé.

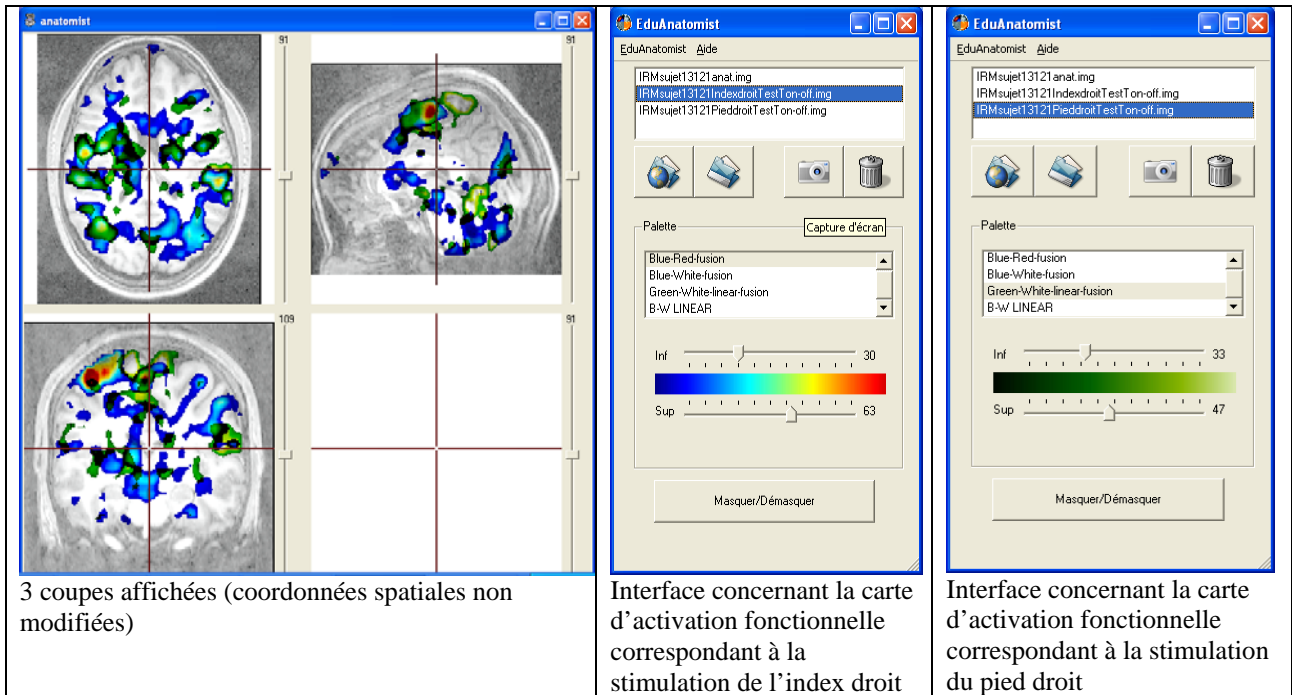


Figure 11 : copie d'écran du groupe 4A

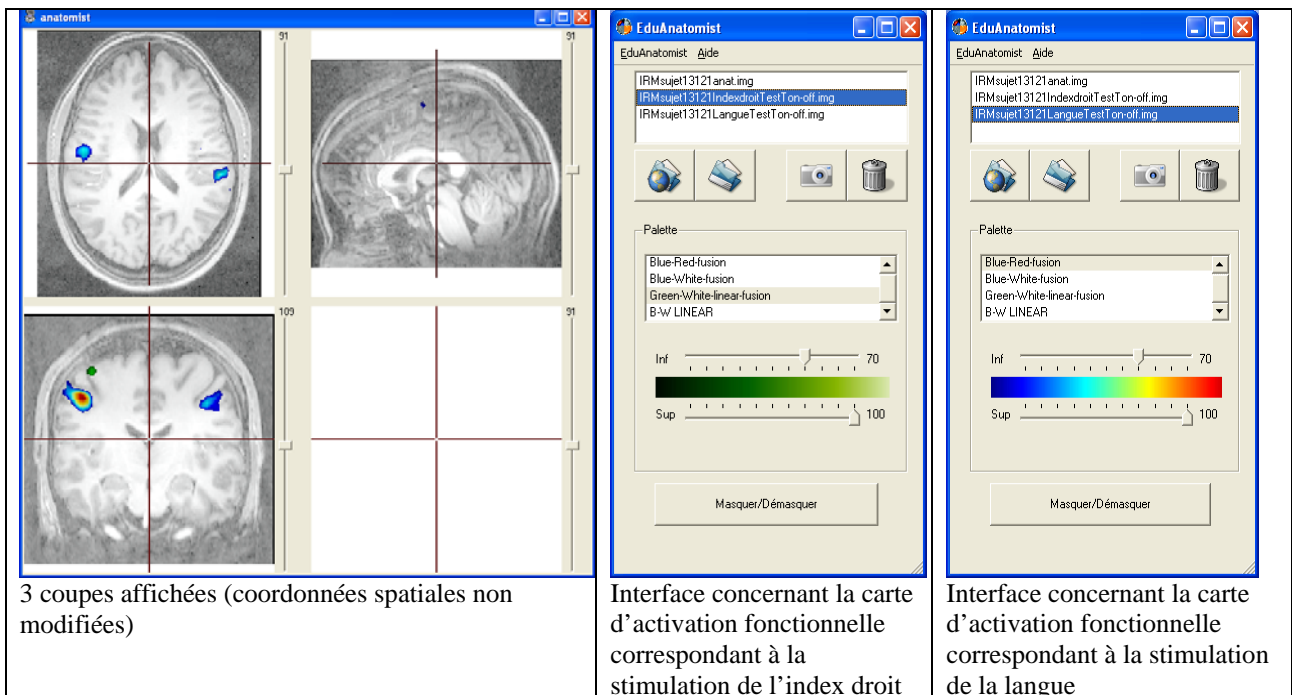


Figure 12 : copie d'écran du groupe 1B

V.1.3.2. Pertinence des coordonnées spatiales sélectionnées par les élèves

Si les coordonnées spatiales choisies par les élèves étaient pertinentes, elles permettraient de visualiser les régions activées de manière significative lors de la stimulation de chacune des deux régions du corps étudiées, et étaient comprises dans les intervalles donnés au Tableau 4 p 23. La Figure 13 présente la répartition des coordonnées choisies pour chaque coupe en trois catégories : celles qui permettaient de visualiser deux régions spécifiques de deux stimulations différentes,

celles qui permettaient d’afficher seulement une de ces régions, et celle qui n’en montraient aucune. Les bornes d’affichage choisies comme références étant 70-100.

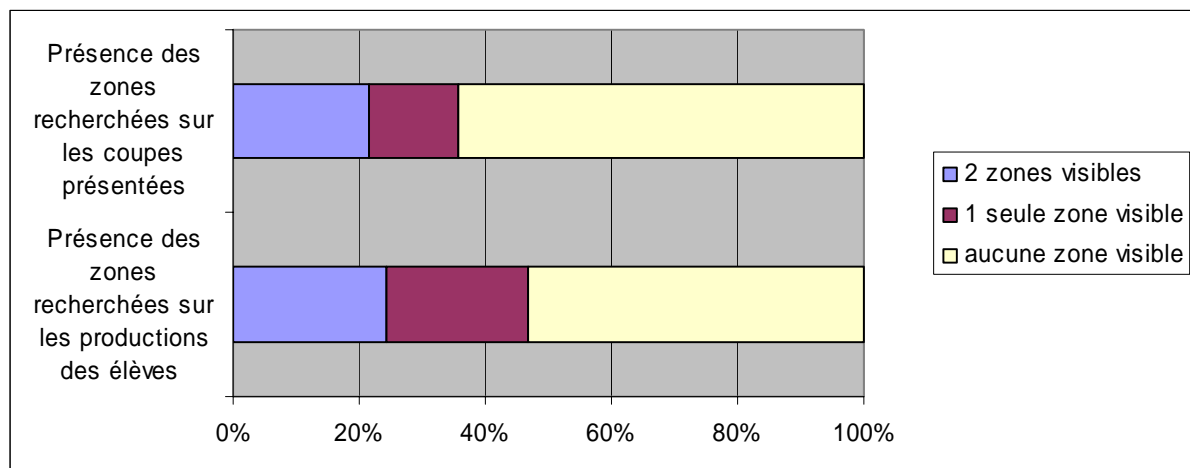


Figure 13 : présence des zones d’intérêt sur les coupes produites et sélectionnées pour les diapositives

On peut voir que 50% des vues en coupe produites ne permettent de visualiser aucune des zones recherchées. Seule, 25% des coupes construites correspondent à des coordonnées permettant de voir 2 zones différentes et 25 % permettent d’en voir seulement 1. On pourrait penser que parmi ces coupes produites, seules les coupes significantes ont été retenues par les élèves pour réaliser leur présentation, mais ce n’est pas le cas. On voit en effet que la proportion de coupes significantes pour 1 ou 2 zones est inférieure parmi les coupes retenues pour la présentation. Dans l’ensemble, les élèves ont donc eu du mal à produire et sélectionner les coupes les plus pertinentes pour répondre au problème posé. Comme nous l’avons déjà évoqué ci-dessus, cette difficulté pourrait provenir de l’absence d’une représentation du cerveau comme un objet à 3 dimensions, d’un défaut de maîtrise des outils de déplacement dans l’espace, mais aussi d’un réglage inadéquat des bornes d’affichage qui peut être le signe d’une mauvaise compréhension de la notion de carte fonctionnelle résultant d’un traitement statistique. Ces 3 obstacles peuvent empêcher les élèves de réaliser l’étape de choix des coordonnées spatiales pour la construction d’une carte d’activation fonctionnelle.

V.1.4. Retour sur l’hypothèse 1

Les élèves peuvent réaliser certaines étapes de la construction d’une carte d’activation fonctionnelle en utilisant le logiciel *EDUANATOMIST*.

D’après nos observations, les élèves ont pu réaliser certaines étapes de la construction d’une carte cérébrale d’activation fonctionnelle à l’aide du logiciel *EDUANATOMIST* :

- en ce qui concerne les fichiers à utiliser, les choix qui concernent le sujet testé et les zones du corps stimulées ne semblent pas poser de difficultés. Par contre, la discrimination entre les fichiers correspondant à des images brutes d’acquisition du signal BOLD dans différentes conditions, des images brutes moyennées et des cartes d’activation fonctionnelle après traitement statistique s’est révélée difficile et chronophage. Les difficultés observées montrent combien ce travail pourrait être intéressant pour les élèves du point de vue didactique, s’ils avaient la possibilité d’évaluer par eux-mêmes la pertinence de leurs choix. En absence de rétroaction du milieu, cette étape de choix nécessite cependant un temps supérieur à celui dont dispose en général un enseignant pour une classe de première S. Une recherche sur d’éventuelles rétroactions pourrait donc être menée.
- L’étape de réglage des bornes d’affichage des seuils de signification statistique des voxels est apparue comme essentielle : elle est en relation avec le test statistique qui est une étape

déterminante pour la signification de l'image construite, elle a des conséquences importantes sur l'étape suivante de choix des coordonnées spatiales. Cette tâche importante n'a pas été réalisée de manière pertinente par une majorité des élèves, malgré le travail préliminaire sur le test statistique. On peut penser que la signification des curseurs sur l'interface du logiciel n'est pas suffisamment explicitée, que la tâche de réglage n'était pas demandée de façon assez explicite aux élèves, mais aussi que la situation manquait d'éléments permettant aux élèves d'évaluer la pertinence de leurs choix. La possibilité de consulter les documents utilisés lors de la séance précédente sur le test statistique, la mise à disposition d'informations précises concernant la signification statistique de ces curseurs pourraient donc être envisagées.

- L'étape de choix des coordonnées spatiales n'a pas été réalisée correctement par plusieurs groupes d'élèves. Elle n'était sans doute pas demandée de façon assez explicite. De plus elle s'est révélée être dépendante d'autres éléments, dont certains peuvent se constituer en obstacles. Elle nécessite en effet, la construction d'une représentation tridimensionnelle du cerveau, la maîtrise des outils de déplacement et de positionnement dans l'espace fournis par le logiciel, un réglage correct des bornes d'affichage, une bonne compréhension du problème posé et la maîtrise de la signification de la gradation de couleur de l'échelle. A ce propos, notre travail pointe la difficulté de représentation de cette gradation de couleur sur l'interface du logiciel : il est difficile de comprendre que l'ensemble de l'échelle de couleur est ré-étalée entre les bornes inférieure et supérieure choisies. Cette étape nous paraît donc réalisable par les élèves, sous certaines conditions dont il faudrait tenir compte dans la construction de la séance. Des moyens permettant aux élèves d'évaluer la pertinence de leurs choix nous paraissent aussi devoir être recherchés.

V.2. Compréhension du traitement statistique des données des IRMf

Hypothèse 2 : Comprendre l'étape de traitement statistique des données d'IRMf nécessite la mobilisation de connaissances sur la statistique

Les productions des élèves lors de l'activité préliminaire d'utilisation d'un test statistique pour la comparaison de deux séries de mesures ont été analysées sommairement. Les réponses des élèves aux questions posées et les éléments que nous en avons tirés sont présentées en annexe 6. Nous résumons ici nos conclusions (Figure 14) et présentons plus en détail la comparaison de certains résultats avec ceux obtenus lors de la deuxième séance.

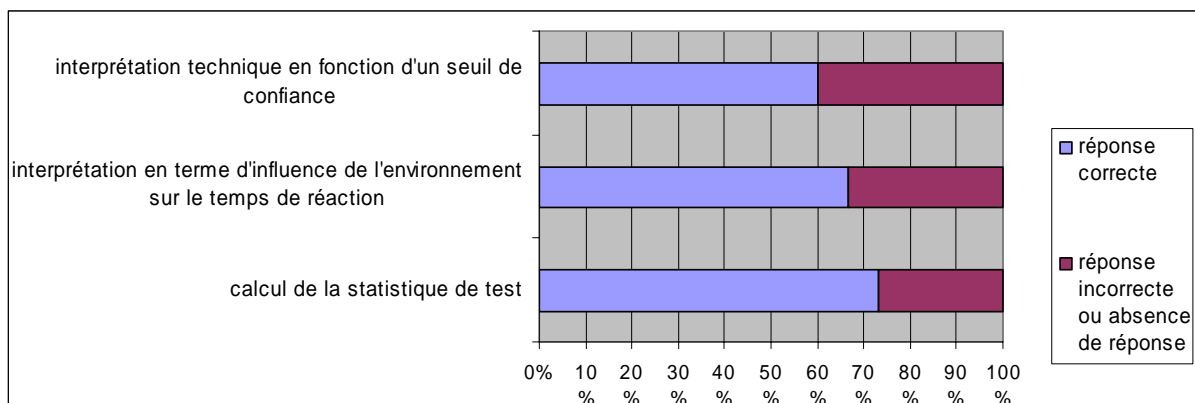


Figure 14 : tâches réalisées par les élèves lors de l'activité préliminaire statistique

V.2.1. Calcul de la statistique de test avec la feuille EXCEL

Sur les 15 binômes ayant travaillé durant cette activité, 13 ont rédigé des réponses et 11 (71%) ont calculé correctement la statistique de test demandée. L'utilisation de la feuille de calcul EXCEL a donc été assez bien maîtrisée.

V.2.2. Interprétation des résultats du test statistique

Nous avons observé que 10 binômes sur 15 (67%) produisaient une réponse en cohérence avec les résultats du test pour la question : « 2- Indiquez si l'environnement modifie le temps de réaction. Argumentez votre réponse. ». La question plus technique « 3- La différence entre les deux séries de mesures est-elle significative au seuil de confiance 95% ? Argumentez votre réponse. », présente 9/15 réponses cohérentes avec les résultats du test (60%). On peut donc dire qu'une partie importante des élèves ont compris le principe du test statistique et ont réussi à manipuler leurs résultats pour répondre aux questions posées. Cependant 30 à 40% des groupes n'ont pas suffisamment compris pour avoir le temps de rédiger une réponse. Selon les avis exprimés par les élèves à la fin de ce travail, ce qui leur a été proposé était intéressant, mais difficile.

V.2.3. Registre utilisé pour exprimer le risque associé au test

Comme on peut le voir sur la Figure 15, le registre préférentiellement utilisé par les élèves pour argumenter leur réponse à la question « 3- La différence entre les deux séries de mesures est-elle significative au seuil de confiance 95% ? Argumentez votre réponse », est celui du « risque de se tromper », même si la question est plutôt formulée dans le registre de la « confiance accordée à la signification de la différence ». Ce n'est pas très étonnant, car l'ensemble de la séance a plutôt été construit dans ce registre du risque. On peut se demander si cela n'a pas constitué un obstacle pour la lecture de l'échelle de signification statistique des cartes d'activation fonctionnelle sur EDUANATOMIST, qui correspond plutôt à une gradation de confiance. On peut aussi remarquer que les élèves font référence assez souvent à des valeurs calculées, ce qui montre qu'ils les manipulaient relativement bien.

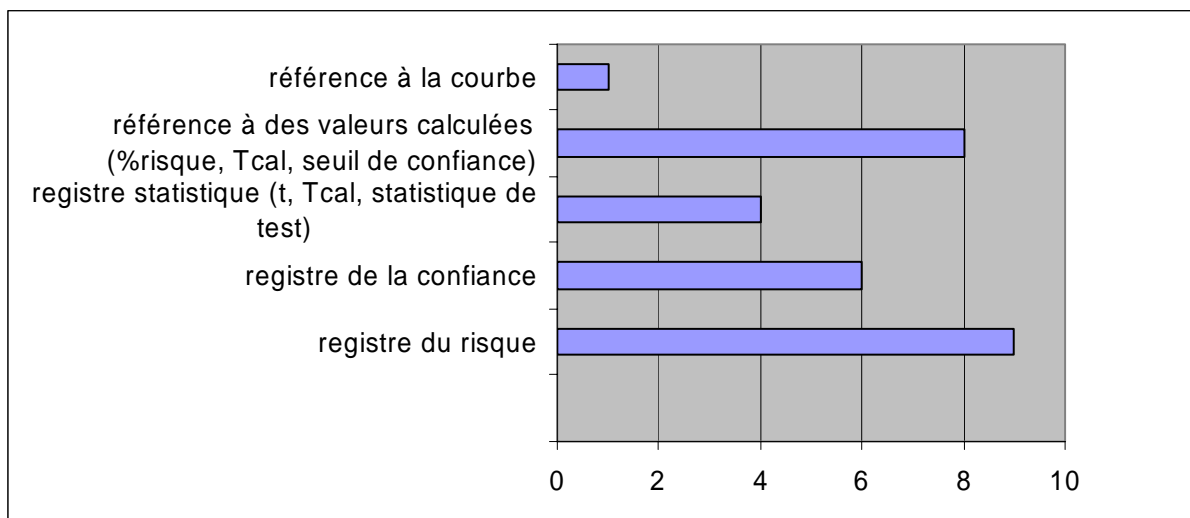


Figure 15 : registres utilisés en réponse à la question 3 sur la signification de la différence observée

V.2.4. Éléments mobilisés pour l'argumentation

Dans les arguments proposés en réponse à la question « 2- Indiquez si l'environnement modifie le temps de réaction. Argumentez votre réponse. », la notion de risque est utilisée dans 4/15 cas,

chaque fois de manière pertinente. Des valeurs numériques sont données par 7/15 binômes : elles concernent 4 fois la différence entre les moyennes, 2 fois les moyennes, 2 fois Tcal et 3 fois le risque. Dans 6/7 cas elles sont correctement calculées.

Pour cette même question, 6/15 groupes donnent directement une réponse d'ordre général, 4/15 évoquent l'élève « cobaye », 3 font une comparaison avec les autres élèves et 2 seulement proposent une généralisation à partir de leur exemple. On peut donc voir que le raisonnement statistique n'est pas facile à assimiler. Il n'est pas « naturel » chez les élèves avant la séance, et tous les binômes ne l'ont pas acquis avec cette séance. Cet apprentissage nous paraît cependant être un pré-requis pour la séance sur les IRM.

V.2.5. Compréhension du test statistique et réglage des bornes d'affichage

Le Tableau 6 présente les réglages des bornes d'affichage en regard des résultats de la première séance concernant l'utilisation d'un test statistique pour comparer deux séries de mesures.

Tableau 6 : réglages des bornes d'affichage et connaissances statistiques¹²

groupes	1° image		2° image		Analyse des réponses lors de l'activité préliminaire statistique		
	borne inférieure	borne supérieure	borne inférieure	borne supérieure	Interprétation cohérente du test T (Q3)	Réponse globale cohérente av résultats du test (Q2)	argumentation montrant la compréhension du test T
2A	40	100			oui	oui	test compris
4A	30	63	33	47	oui	non	test compris
5A	38	95	32	95	oui	oui	test non compris
6A	30	76	0	30	non	oui	test non compris
1B	70	100	70	100	oui	oui	test compris
2B	32	100	32	100	oui	oui	test compris
3B	49	100	75	100	non	oui	test compris
5B	50	100	78	100	oui	pas de réponse	test compris
6B	44	95	44	95	non	oui	test non compris
7B	56	100			non	oui	pas de réponse
8B	30	100	30	100	oui	oui	test compris ?

On peut remarquer que les 3 binômes qui n'avaient manifestement pas compris le principe du test statistique à la séance I préliminaire (en vert dans le tableau), n'ont pas correctement réglé la borne supérieure lors de la séance II. Parmi les sept binômes qui semblent avoir compris le principe du test T, six ont réglé correctement la borne supérieure (en bleu dans le tableau) et un seul n'a pas effectué correctement ce réglage (en violet dans le tableau). On peut donc émettre l'hypothèse que les connaissances de statistique construites lors de la première séance ont été utiles aux élèves pour régler la borne supérieure d'affichage lors de la deuxième séance.

Les résultats sont moins évidents en ce qui concerne le réglage de la borne inférieure, qui a été plus difficile pour les élèves. On peut tout de même remarquer que parmi les élèves pour lesquels nous disposons d'informations, seuls des élèves ayant compris le test à la 1° séance ont effectué ce réglage de manière pertinente (surlignés en jaune dans le tableau). Mais sur les sept binômes ayant compris le principe du test en séance I, quatre n'ont pas réglé correctement la borne inférieure, et deux ne l'ont réglé correctement que pour une seule des deux images. Le travail réalisé à la première séance ne semble pas avoir été suffisant, ou suffisamment mis en relation avec le protocole de construction d'IRM fonctionnelle et l'interface du logiciel pour être effectivement

¹² Seuls sont présentés les binômes pour lesquels les réglages des bornes d'affichage et les réponses aux questions de la première séance sont disponibles

utilisable par les élèves lors du réglage de la borne inférieure. En effet, la correspondance entre le risque accepté et les valeurs de l'échelle apparaissant sur l'interface n'a pas été explicité aux élèves. Nous pouvons cependant affirmer que certains élèves, qui avaient compris le maniement du test statistique lors de l'activité préliminaire, ont mobilisé ces connaissances lors de la sélection des bornes d'affichage. Cette remarque écrite sur la fiche réponse du groupe 3B mobilisant la notion de risque, le montre :

« On a fait le choix de sélectionner un risque peu élevé car c'est entre les valeurs de 50 (ou 75 inf) à 100 sup que les zones les plus irriguées sont les mieux localisées » (groupe II3B, Question 2- en fin de séance : Utilisez votre travail pour revenir sur les hypothèses proposées).

V.3. Construction d'une représentation d'IRMf en tant que modélisation

Hypothèse 3 : Réaliser certaines étapes de la construction de la carte d'activation fonctionnelle permet aux élèves de se construire une représentation de l'IRMf comme une modélisation

Le modèle « outil de l'investigation scientifique », a été décrit par Sanchez et Prieur (Sanchez et Prieur, 2007), selon le schéma Figure 16. Les caractéristiques et les fonctions du modèle peuvent être considérées comme des attributs de ce modèle. Nous proposons de repérer dans les informations que les élèves ont associées à l'image IRMf celles qui sont en relations avec certaines de ces caractéristiques et de ces fonctions. Leur présence dans les productions des élèves, pourrait être un argument pour dire que les élèves incluent certains attributs d'un modèle dans leurs représentations des IRMf.

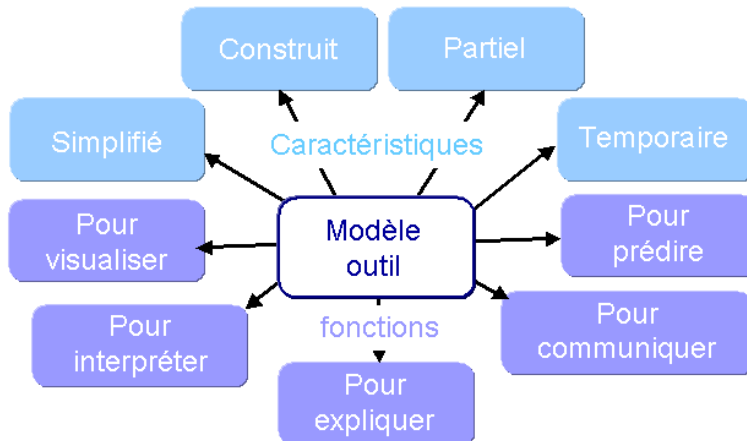


Figure 16: schéma des caractéristiques et des fonctions d'un modèle, outil pour l'investigation scientifique

V.3.1. Informations ajoutées aux images dans les présentations POWERPOINT

Pour rechercher quelles étapes de la construction ont été significantes pour les élèves, nous avons analysé le titre et les légendes produits dans la présentation POWERPOINT, en observant quelles étapes de la construction de l'image ont été indiquées. Les résultats sont présentés Figure 17 et Figure 18, les tableaux d'analyse étant disponibles dans l'annexe 7.

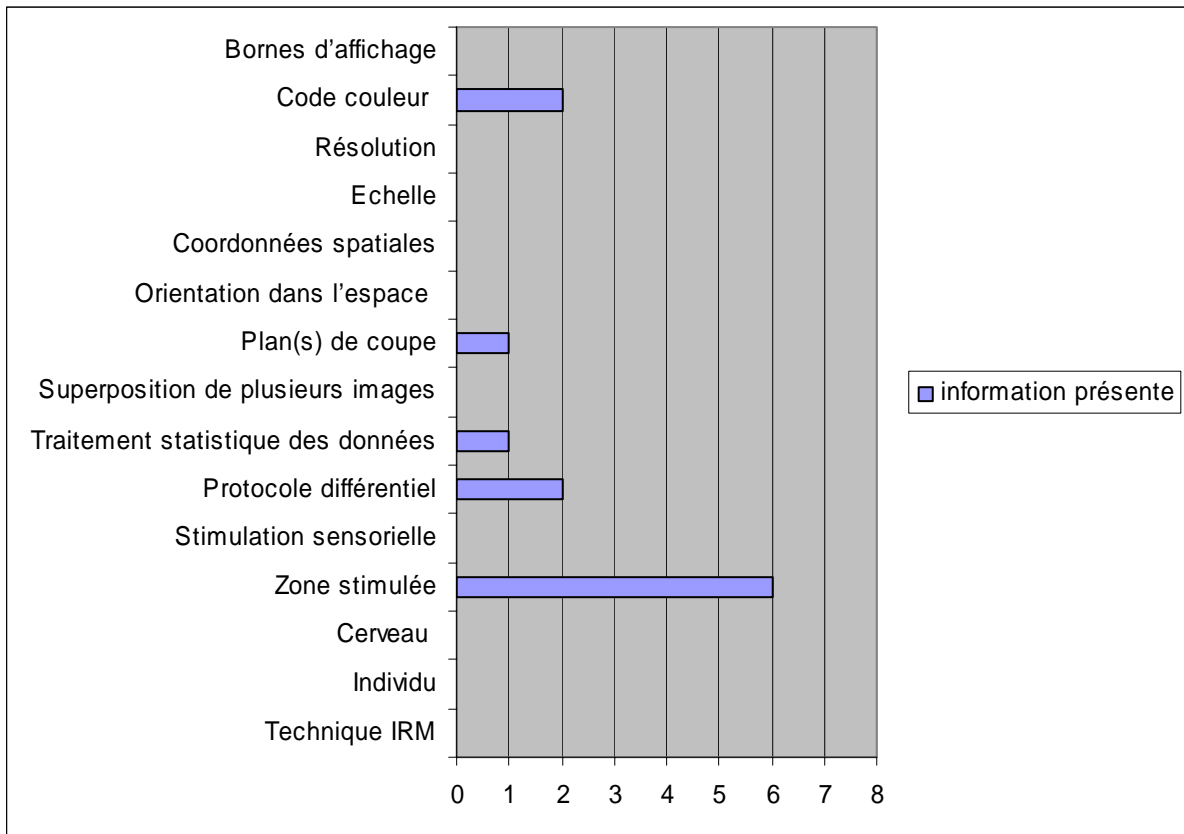


Figure 17 : informations ajoutées à l'image (Groupe A)

Pour le groupe A, qui a passé beaucoup de temps sur le choix des fichiers IRM, très peu d'informations ont été ajoutées aux images sur les diapositives. Le nom des zones du corps stimulées est l'information la plus représentée, même si le fait que la zone ait été stimulée n'apparaît généralement pas. Les autres informations qui apparaissent concernent le paradigme expérimental (protocole différentiel et traitement statistique des données), ainsi que le nom des plans de coupe et des éléments sur le code couleur. Aucune diapositive n'indique le nom de la technique utilisée (IRM), le numéro de l'individu observé, le fait qu'on observe le cerveau, ni que plusieurs images sont superposées. Les réglages des coordonnées spatiales et des bornes d'affichage ne sont jamais explicités. Aucun élément d'orientation dans l'espace n'est proposé, l'échelle n'est pas donnée.

On peut donc penser que les conditions de travail de ce groupe n'ont pas permis aux élèves de construire ou d'exprimer des connaissances concernant les processus de modélisation impliqués par la construction d'une IRM. Le temps disponible pour la réalisation de la présentation *POWERPOINT* à partir des images construites a été si court, qu'on ne peut pas vraiment le considérer comme une véritable *situation de formulation* au sens de Brousseau (Brousseau, 1998), et il nous paraît impossible de conclure sur la construction d'une éventuelle représentation de l'IRMf comme modélisation pour ce groupe.

Pour le groupe B, des informations plus nombreuses sont portées sur les diapositives. On peut donc penser que du temps est nécessaire pour que la légende de l'image se construise, et pour que les étapes de la construction de l'image retenues comme signifiantes par les élèves, puissent être exprimées. On remarquera alors que dans le temps qui a pu être consacré à cette tâche pour ce groupe d'élève, les éléments qui ont été apportés en légende concernent majoritairement des aspects corporels (zone du corps, nom de l'organe observé : cerveau), et des repères spatiaux (plans de coupes, et éléments d'orientation dans l'espace) qui nous paraissent être en rapport avec le caractère

partiel du modèle. D'autres éléments concernant le paradigme expérimental (protocole différentiel, traitement statistique des données, choix des bornes d'affichage, N° du sujet observé) que nous pouvons relier avec les aspects construit et simplifié du modèle, ne sont abordés que rarement. Leur présence sur certaines diapositives montre tout de même que certains élèves leur ont accordé de l'importance, et ont éprouvé le besoin de les faire figurer. Ce résultat soutient l'hypothèse que l'acquisition d'une représentation des IRMf en tant que modélisation, tout au moins dans leurs caractéristiques de modèles partiels, simplifiés et construits, pourrait être favorisée par la réalisation de certaines étapes de leur construction.

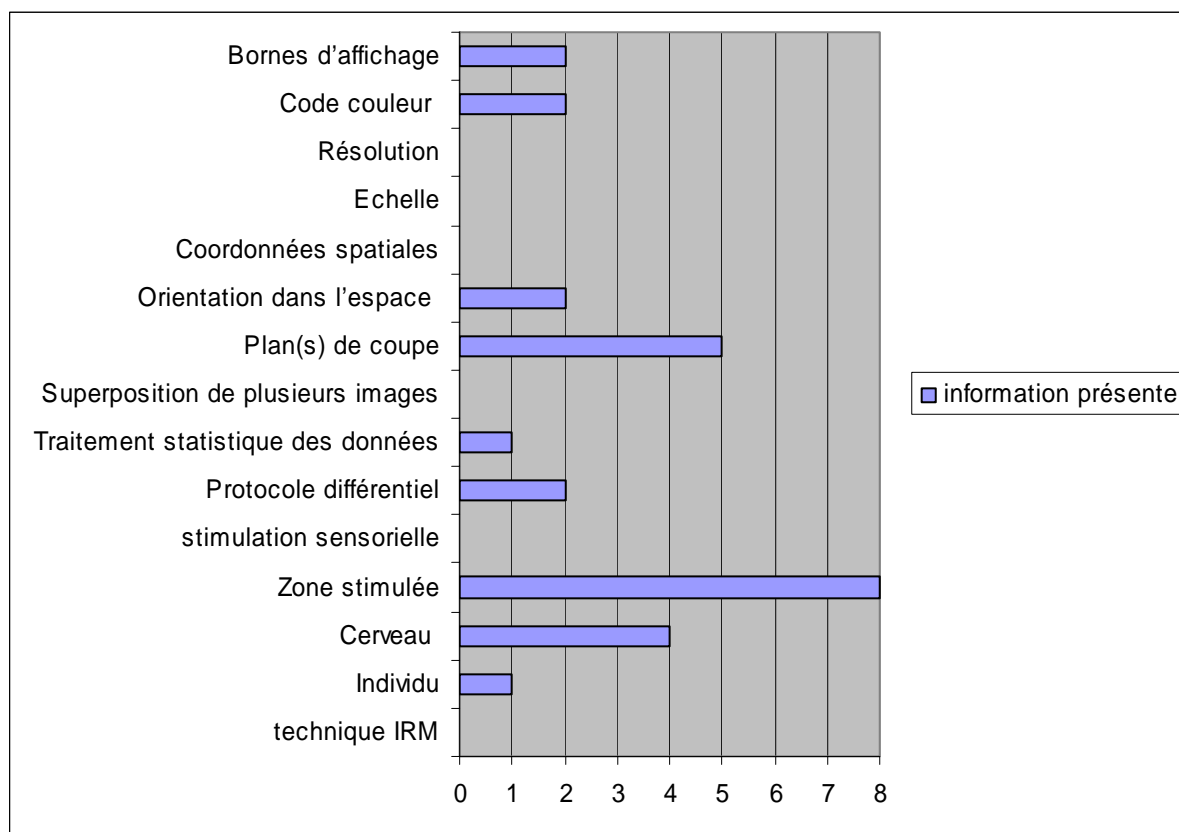


Figure 18 : informations ajoutées à l'image (groupe B)

Cependant, aucune information n'a été portée sur les diapositives concernant le nom de la technique IRM, l'étape de stimulation sensorielle, la superposition de plusieurs images, le choix des coordonnées spatiales, la résolution et l'échelle de l'image. En ce qui concerne la résolution et l'échelle des images, aucune information n'avait été fournie aux élèves, ils ne pouvaient donc pas les reprendre. Dans l'étude de la présentation d'une image scientifique, il paraît aussi important de considérer le destinataire de la communication. Dans ce cas, il s'agissait d'autres élèves du même groupe de TP, ayant travaillé sur le même logiciel de visualisation d'IRM, chacun avec plusieurs images. Il n'est donc pas étonnant que la technique IRM et la superposition d'images n'aient pas été évoquées : les élèves savaient que leurs camarades savaient. Ce n'est pas le cas du choix des coordonnées spatiales, qui ne semble pas avoir été repéré comme important par les élèves à ce stade de leur production.

On voit ici que le destinataire d'une image scientifique présentée par les élèves est une variable didactique importante dans le type de situation que nous avons construite. La séance proposait d'ailleurs une deuxième étape de construction collaborative d'une image à destination d'élèves n'ayant pas utilisé le logiciel, qui n'a pas été réalisée, faute de temps. Elle aurait peut-être permis de voir apparaître d'autres éléments pertinents concernant la construction de ces « images-modèles ».

Pour les deux groupes, le code couleur qui nous paraît en relation avec le caractère construit du modèle, est rarement explicité. Il n'est généralement abordé que par son versant discriminatif des différentes zones stimulées, (voir un exemple Figure 19) qui met en évidence la fonction de visualisation de l'IRMf. Dans cet exemple, il n'est fait aucune référence à l'échelle de teinte qui indique une augmentation de la signification statistique de la différence entre les deux séries de mesures réalisées. Cela peut s'expliquer tout d'abord par l'affichage même de ces couleurs et, au niveau de l'interface du logiciel, par le positionnement des valeurs des bornes de part et d'autre de l'échelle colorée. Cette présentation rend difficile la perception du fait que pour chaque couple de bornes inférieure et supérieure choisie, l'échelle colorée est redistribuée entre les voxels compris entre ces deux valeurs (Figure 20). Nous proposons d'ailleurs de modifier l'interface à ce niveau pour en faciliter la compréhension (voir section VI.2.4).

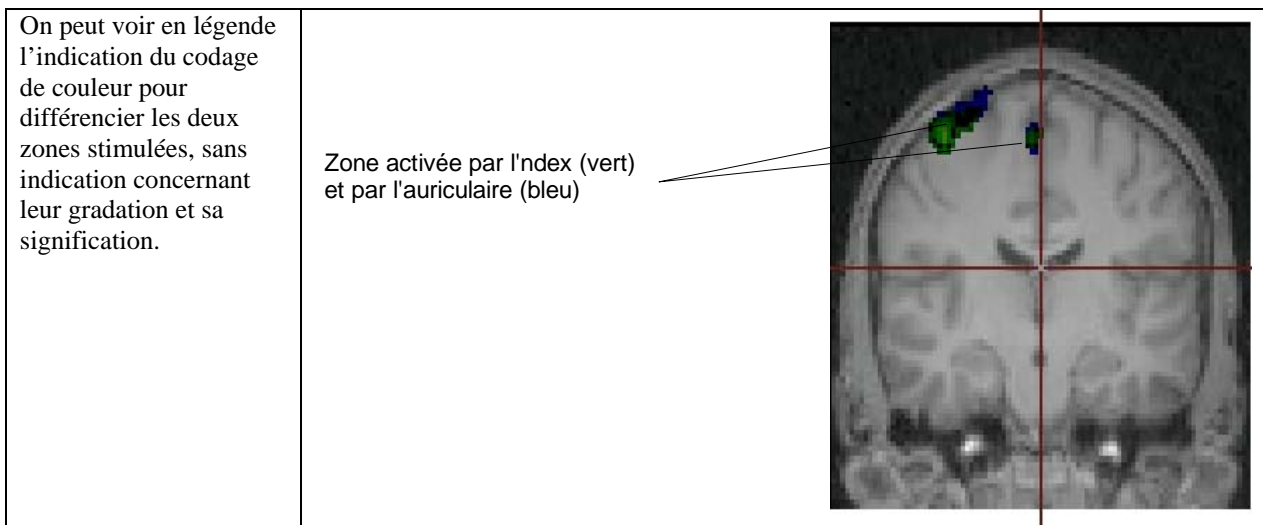


Figure 19 : une diapositive présentée par le groupe A8

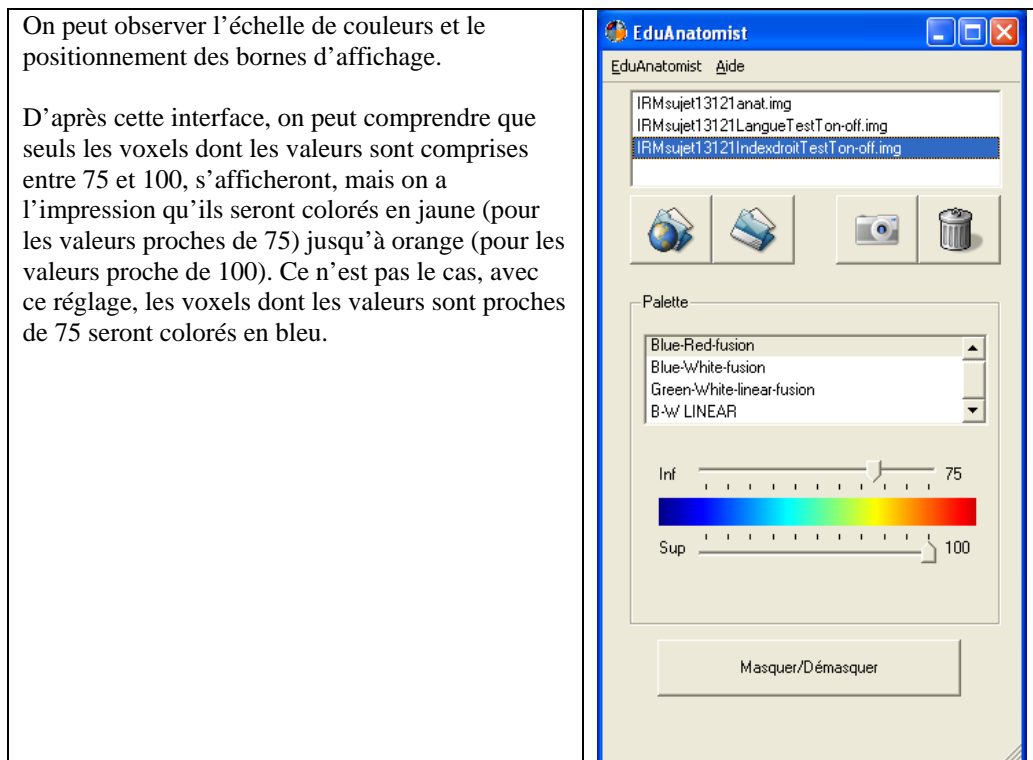


Figure 20 : interface du logiciel *EDUANATOMIST* permettant le traitement d'une IRMf

Pour un seul groupe (8B), on observe l'explicitation du codage en niveaux de couleur représentant l'intensité de l'activité cérébrale (Figure 21). Le traitement statistique des données n'est pas mentionné. On peut dire que ce groupe a réellement travaillé sur les relations entre signifiant et signifié et référent de cette image, et qu'il a mis en œuvre les fonctions de visualisation et de communication du modèle.

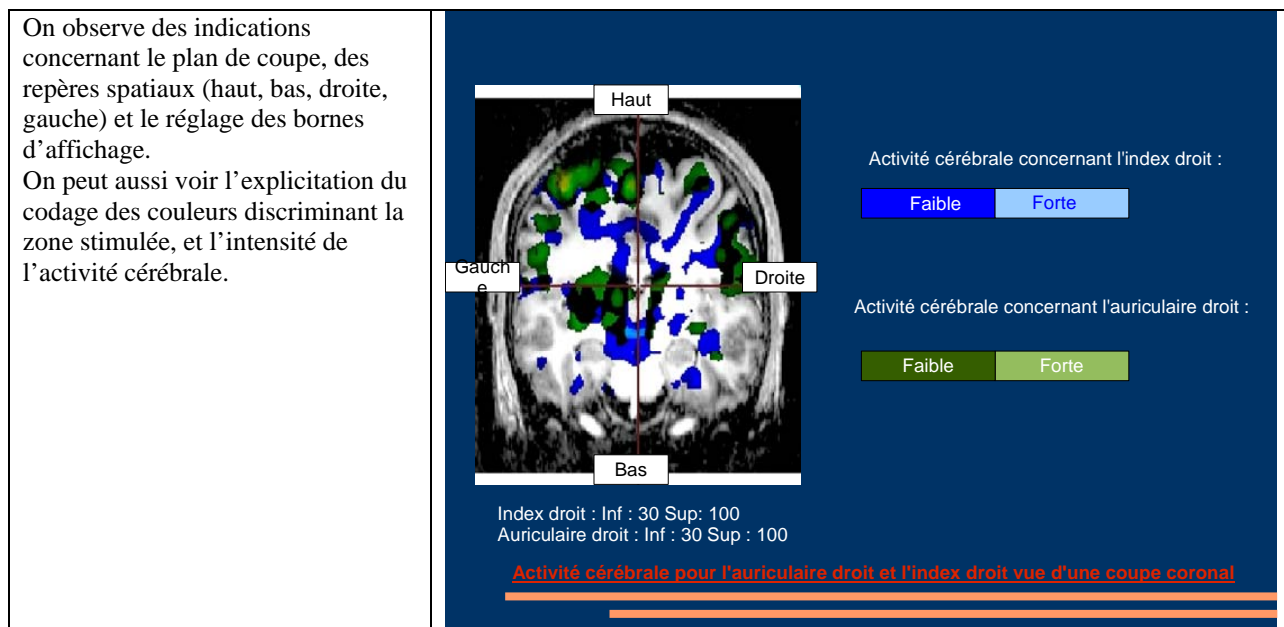


Figure 21 : une diapositive produite par le groupe 8B

V.3.2. Références aux étapes de la construction de l'image

Les réponses apportées par les élèves aux différentes questions sont regroupées dans l'annexe 8. Il faut remarquer qu'elles ont souvent été rédigées en fin de séance, de manière rapide, et après la phase de collaboration entre binômes. Les apports des activités de construction de la carte et d'échange à son propos ne peuvent donc pas être distingués par l'examen de ces traces. Les réponses à la question 2, concernant le retour sur les hypothèses, et qui font référence à l'une des étapes de la construction de la carte d'activation fonctionnelle sont reprises dans le tableau 7. Elles concernent 4 des 6 binômes ayant produit une réponse à cette question. Les élèves du groupe A, qui ont travaillé de façon plus importante le choix des fichiers IRM, évoquent le protocole différentiel, qui correspondait à l'un des critères de choix des fichiers et qui est en relation avec le caractère simplifié du modèle IRMf. Ils montrent cependant qu'ils ont mal compris la stimulation d'une zone corporelle, puisqu'ils parlent de mouvement.

Les élèves du groupe B, reprennent le choix des bornes d'affichage et des coordonnées spatiales, qui ont représentés pour eux les étapes majeures à réaliser. Ils associent ainsi à la carte cérébrale d'activation fonctionnelle produite, un caractère à la fois partiel et simplifié correspondant à des attributs de modèle. On retrouve aussi l'utilisation de l'IRMf comme modèle dans sa fonction de visualisation (binôme 3B), pour interpréter (binôme 5A) et pour communiquer, puisque ces élèves font références à leurs images pour répondre à la question posée.

Sur ce petit nombre de réponses, on peut donc remarquer que certains élèves sont capables de faire appel à des étapes de la construction de l'image qu'ils ont réalisées, ou qu'ils ont dû envisager pour effectuer leurs choix, et qu'ils relient ces étapes à l'image construite.

Tableau 7 : extraits des réponses écrites des élèves reprenant certaines étapes de la construction de la carte d'activation fonctionnelle

binômes	Extraits de la réponse à la question 2 (en fin de séance : Utilisez votre travail pour revenir sur les hypothèses proposées)	Étapes de construction de l'image citées
5A	« D'après notre diapositive, lorsqu'un individu bouge son index droit, une grande partie du cerveau fonctionne. Après avoir déduit les résultats d'influence sanguine lorsque ce même individu ne bouge pas son index droit, nous remarquons que la partie gauche du cerveau subit une influence sanguine plus forte. Donc, lorsque l'index droit bouge, la partie gauche du cerveau subit une influence sanguine, et non la partie droite (du cerveau). Nous pouvons donc en conclure qu'une partie du corps qui se meut (du verbe se mouvoir) est contrôlée par la partie du cerveau qui lui est opposé. Les résultats d'activité de la langue et de l'index sont très différents, aucune influence sanguine en commun. On peut donc en conclure que chaque région du cerveau est spécialisée. »	Mouvement du doigt (au lieu de stimulation) Protocole différentiel
2B	« On peut dire que chaque zone du cerveau s'occupe d'une zone spécifique du corps, car avec 70-100, la zone est petite mais c avec une forte... »	Choix des bornes d'affichage
3B	« On a fait le choix de sélectionner un risque peu élevé car c'est entre les valeurs de 50 (ou 75 inf) à 100 sup que les zones les plus irriguées sont les mieux localisée »	Choix des bornes d'affichage Traitement statistique
6B	« Les coordonnées utilisées par rapport au curseur se sont avérées importantes pour avoir la vraie image vue par notre camarade »	Choix des coordonnées spatiales

En vert, les éléments de la réponse en référence à l'image. En bleu, une étape citée mal comprise

V.3.3. Retour sur l'hypothèse 3

Réaliser certaines étapes de la construction de la carte d'activation fonctionnelle permet aux élèves de se construire une représentation de l'IRMf comme une modélisation.

L'examen de cet échantillon réduit de diapositives et de réponses à la question 2, semble montrer que la réalisation de certaines étapes de la construction d'une carte d'activation fonctionnelle peut permettre aux élèves de considérer ces étapes comme des informations significatives, qui doivent accompagner l'image pour lui donner du sens. Évidemment, c'est l'objectif de communication qui leur a été assigné qui permet la formulation de ces éléments. Le temps accordé à la réalisation de cette tâche ainsi que le destinataire de la communication semblent donc représenter des variables didactiques importantes de cette situation.

Ces informations suggèrent que certaines caractéristiques typiques d'un modèle, comme l'aspect construit et partiel, peuvent être attribuées par les élèves aux images IRM qu'ils ont produites. La carte cérébrale d'activation fonctionnelle est aussi utilisée par certains élèves comme un outil de visualisation, d'interprétation et de communication. La situation leur permet alors d'expérimenter ces fonctions du modèle scientifique. Après les tâches de construction de la carte qui leur ont été proposées, les élèves semblent donc accéder à certains éléments qui caractérisent un modèle, mais pas à tous.

V.4. Apports de la communication entre élèves

Hypothèse 4 : Produire une carte d'activation fonctionnelle dans un but de communication avec des pairs pourrait permettre aux élèves de valider leurs stratégies de construction et de présentation de cette carte.

Pour explorer cette hypothèse, nous avons recherché dans les historiques MSN des échanges entre pairs, l'argumentation développée par les élèves pour décider des modifications des cartes ou de leur présentation, et étudié le lexique utilisé. Les historiques complets des 5 échanges MSN (clavardages) réalisés par les élèves sont présentés dans l'annexe 9. Nous avons également croisé les différentes informations disponibles pour reconstituer les modifications réalisées durant l'étape collaborative entre deux binômes. Les résultats de cette analyse sont présentés dans le tableau 8. Nous examinerons d'abord les données concernant la construction de la carte, puis nous nous focaliserons sur sa présentation.

Tableau 8 : interactions entre binômes et reconstitution des modifications sur les productions des élèves

Informations tirées des comparaisons des documents échangés et des clavardages. Pour mémoire, les captures d'écran permettaient de visualiser les résultats du travail de construction de la carte dans *EDUANATOMIST*. Les « diapositives » ont été produites à partir des images construites dans une visée de communication.

Binômes 1A-2A

Pas de conversation MSN.

- Pour le binôme 1A, il y a deux écrans sauvegardés dans le fichier des copies d'écrans, les bornes d'affichage ont été réglées correctement dans un deuxième temps (durant le travail des deux élèves ensemble, avant l'interaction avec le binôme 2A) et les coordonnées spatiales ont été modifiées sur la coupe coronale pour voir la zone d'activation significative correspondant à la langue.
 - 2A ne présente que l'IRMf concernant l'index, c'est la copie d'écran qui est collée dans la diapositive.
- on ne voit pas de trace de dialogue ni de modification suite à l'échange entre les deux binômes.

Binômes 3A-4A

Pas de conversation MSN

Pour 3A, le fichier des copies d'écran n'a pas été sauvegardé.

Pour 4a, on voit une différence entre les copies d'écran et la diapositive : dans la copie d'écran, les deux images fonctionnelles sont superposées, dans la présentation, chaque diapo correspond à un seul type de stimulation (masquage de l'autre image fonctionnelle) ; les couleurs correspondent aux images construites.

→ on ne voit pas de trace de dialogue ni de modification suite à l'échange entre les deux binômes.

Binômes 5A-6A

La conversation MSN n'est pas très fournie (un groupe remarque juste qu'on ne voit pas « *les zone d'afflux sanguin* » [sic]). Les échanges de fichiers sont nombreux cependant, après avoir échangé les fichiers de copies d'écran, puis une image en pdf, ils s'envoient des présentations *POWERPOINT*. En comparant les différentes étapes on voit que :

- 5A semble avoir modifié les bornes d'affichage et/ou les coordonnées spatiales suivant les coupes, mais il nous a été impossible de reconstituer ces changements
- 6A a ajouté une image anatomique (individu 1212 utilisé dans l'activité préliminaire), semble avoir modifié les réglages des coordonnées spatiales (passant de 91 à 34 pour la coupe axiale sélectionnée) sans changer les bornes d'affichage (30-76).
- Les légendes ont été homogénéisées entre les deux groupes : Il semble que 5A ait indiqué « *zones d'influences sanguines* » [sic] en légende, après que 6A lui ait écrit « *on ne voit pas tt a fait les zones d'aflut sanguin* » [sic], et que 6A ait repris en légende « *zones d'influences sanguine* ».

Binômes 7A-8A

Pas de clavardage

- Pour 7A, la vue coronale choisie pour la diapositive correspond au fichier de copies d'écran.

- Pour 8A, les images des diapositives ne correspondent pas du tout aux copies d'écran : les zones colorées sont plus circonscrites, ce qui pourrait signifier que les bornes d'affichage ont été modifiées. Les coordonnées spatiales semblent avoir été modifiées pour la coupe coronale.

→ on ne voit pas de trace de dialogue ni de modification suite à l'échange entre les deux binômes.

Binômes 1B-2B

Les présentations *POWERPOINT* n'ont pas été modifiées, mais d'après l'analyse des clavardages, des modifications étaient prévues concernant les bornes d'affichage de 2B. Une discussion sur la relation entre le risque d'erreur et les valeurs de l'échelle a eu lieu. Des bogues informatiques ont empêchés les élèves de faire les modifications.

Binômes 3B-5B

Les élèves ont choisi (sur des critères « esthétiques » ?) de compléter la présentation de 3B. La discussion s'est portée sur la légende : 5B propose et réalise l'ajout d'informations concernant la stimulation et le plan de coupe. 5B veut aussi faire figurer les « coordonnées », 3B donne ses bornes d'affichage, le temps de se comprendre, l'ajout n'est pas fait sur la carte.

Binômes 4B-6B

La conversation MSN a été peu importante (surtout des problèmes techniques d'échange de fichiers). La diapositive 5 de 4B semble provenir du groupe 6B et avoir été ajoutée sans modifications. La diapositive 6 qui reprend une image de chacun des groupes semble être un début de synthèse.

Binômes 7B-8B

Le clavardage a surtout porté sur le choix des bornes d'affichage. Le groupe 7B avait choisi une valeur plus élevée pour la borne inférieure et essayait de convaincre 8B de faire de même. Il semble que ces valeurs étaient indiquées en légende du groupe 7B mais pas 8B (puisque 7B les demande à 8B) et qu'elles ont été portées sur les diapositives par 8B suite à la conversation. 8B semble avoir inclus la diapositive de 7B dans son diaporama, en lui appliquant sa propre présentation (fond d'écran, titre et légende).
=> 8B n'a pas changé ses bornes d'affichage mais a complété sa légende et sa présentation, en insérant une erreur dans la légende concernant la zone stimulée (le titre est correct).

V.4.1. Échanges concernant la construction de la carte d'activation fonctionnelle

Les échanges entre binômes à propos de la construction de la carte d'activation fonctionnelle, concernent trois associations de binômes sur sept. Ils ont porté sur trois étapes de la construction de la carte : le choix des fichiers IRM, la sélection des bornes d'affichage et le réglage des coordonnées spatiales.

V.4.1.1. Choix des fichiers IRM

Les fichiers successivement envoyés à 6A par 5A sont présentés Figure 22. L'interaction de ces binômes a abouti à la superposition d'une IRM anatomique à l'IRMf par le groupe 6A. Cette modification n'a pas été discutée dans la conversation MSN, qui a surtout consisté à de nombreux échanges de fichiers. On peut penser que la visualisation par 6B de la carte d'activation fonctionnelle produite par 5B a permis aux élèves de 6B de percevoir l'intérêt de la superposition d'une image anatomique pour les repérages des régions activées dans le cerveau. Mais dans la nouvelle production de 6B, la carte fonctionnelle a été superposée sur l'image anatomique d'un autre individu. Cela peut être repéré, car les zones colorées de l'IRM fonctionnelle dépassent les structures anatomiques sur la coupe présentée. On retrouve ici la difficulté d'évaluation de la pertinence de l'image : l'image produite n'a pas de signification, mais les élèves ne s'en sont pas rendu compte, et la situation de communication n'a pas permis de résoudre ce problème.

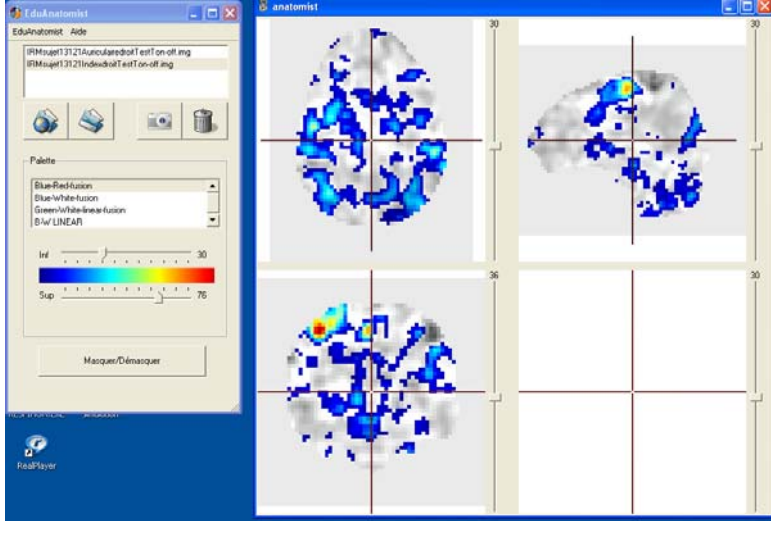
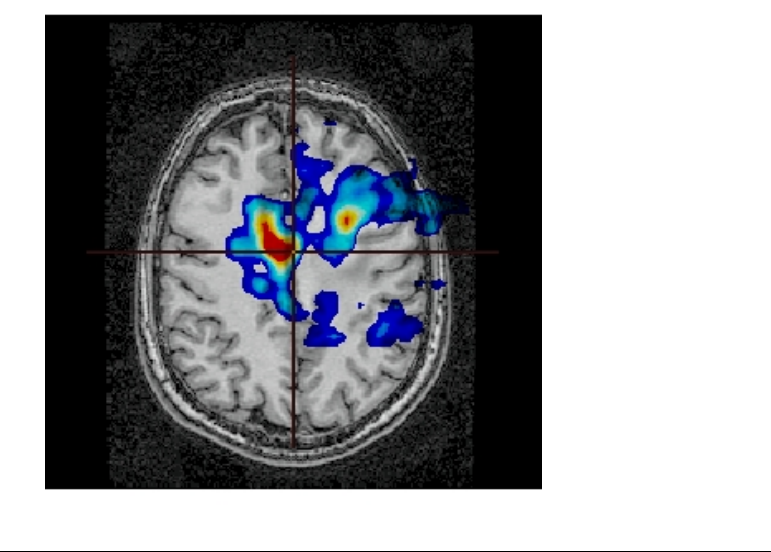
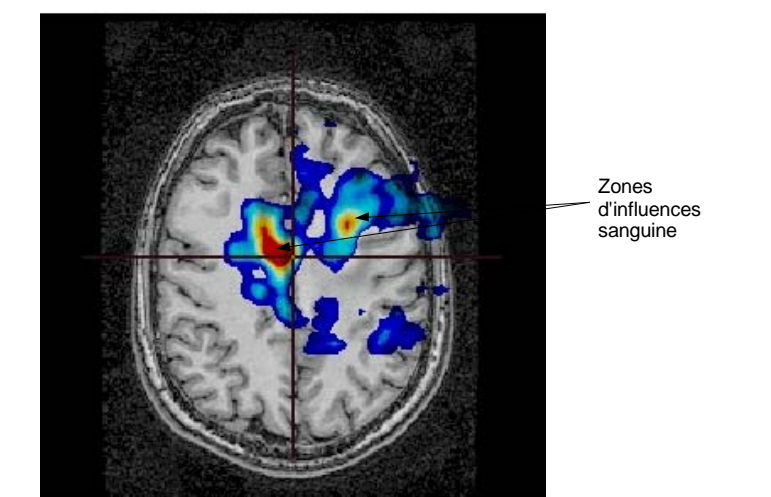
Ordre d'envoi	Document envoyé par 6A à 5A	réglages
<p>1 Copie d'écran</p>		<p>Fichiers IRM (et palette) :</p> <p>IRM13121auriculaire droit TestTon-off (noir-blanc) Bornes : 0 - 30</p> <p>IRM13121indexdroit TestTon-off (bleu-rouge) Bornes : 30 – 76</p> <p>Coordonnées spatiales : Axiale : 30 Sagittale : 30 Coronale : 36 (valeurs par défaut pour les IRMf seule)</p>
<p>2 Image jpeg</p>		<p>Fichiers IRM (et palette) :</p> <p>IRM1212anat Contraste : 0 – 30</p> <p>IRM13121auriculaire droit TestTon-off (noir-blanc) : il est difficile de savoir si elle est encore affichée</p> <p>IRM13121indexdroit TestTon-off (bleu-rouge) Bornes : 30 – 76</p> <p>Coordonnées spatiales : Axiale : 34 (différente de la valeur par défaut : 91)</p>
<p>3 Diapo <i>POWERPOINT</i></p>		<p>Mêmes réglages que l'image précédente</p> <p>Ajout d'une légende</p>

Figure 22: Fichiers successivement envoyés par 6A à 5A
(En rouge, les modifications apportées par rapport au document précédent)

Le choix de l'individu observé, qui doit être le même pour les différents fichiers utilisés, a été une préoccupation des binômes 1B et 2B, comme le montre l'échange Figure 23.

03/04/2009	12 :06 :50	1B	nous avons le meme patient que vous
03/04/2009	12 :07 :16	2B	oui heureusemeny
03/04/2009	12 :07 :30	1B	oui

Figure 23 : extrait du clavardage entre les binômes 1B et 2B (pour le clavardage intégral, voir annexe 9B)

Cet échange a été permis par la légende de la diapositive de 2B qui indiquait le n° d'identification du sujet observé, le considérant déjà comme un élément important. Dans ce cas, la phase de communication a permis la formulation d'un critère de pertinence concernant l'étape de choix des fichiers pour la construction de la carte d'activation fonctionnelle. Toutefois, la distinction entre image anatomique et image fonctionnelle n'est pas abordée.

V.4.1.2. Réglages des coordonnées spatiales

Le premier fichier envoyé par 6A à 5A, correspondait au réglage par défaut des coordonnées spatiales (Figure 22). Le deuxième fichier présente la sélection du plan de coupe axial, et une modification des coordonnées spatiales permettant d'afficher une zone plus colorée par rapport à la coupe axiale précédente. On peut donc supposer que l'échange avec l'autre groupe a amené les élèves à faire une recherche spatiale des zones les plus colorées. Cependant, comme les bornes d'affichage sélectionnées ne sont pas pertinentes, la zone colorée en rouge ne correspond absolument pas à la région cérébrale significativement activée lors de la stimulation de l'index droit. On constate à nouveau que les élèves n'ont pas trouvé, dans la *situation*, les éléments leur permettant d'évaluer les *stratégies* qu'ils ont employées.

V.4.1.3. Sélection des bornes d'affichage

En absence de traçage de l'activité des élèves par le logiciel lui-même, ou d'enregistrement vidéo de l'écran, il est impossible de suivre précisément l'évolution du réglage des bornes d'affichages de chaque groupe. Le problème de leur sélection a cependant été abordé dans deux clavardages (1B-2B et 7B-8B).

→ Binômes 7B-8B : échange argumentatif sans relation faite au test statistique

Dans le cas de 7B-8B, les deux binômes ont discuté le réglage de la borne inférieure sans parvenir à un compromis (Figure 24). Le binôme 7B, qui avait choisi une valeur plus élevée a essayé sans succès de convaincre 8B de faire de même. Aucune modification de la carte n'a été réalisée.

On peut remarquer que si l'échange s'est lancé sur le choix des bornes d'affichage (12 :07 :12 ; 8B : « Explique pourquoi l'écart entre tes curseurs est si étroit ? »), c'est que les valeurs sélectionnées pour ces bornes étaient indiquées sur la diapo de 7B. On peut donc penser que le binôme 7B accordait de l'importance à ce choix, peut-être suite à une discussion avec le professeur (12 :12 :29 ; 7B : « Bin non, c'est le prof qui vient de nous le dire. »)

Les opérateurs logiques (soulignés, Figure 24) utilisés par les deux binômes au début de l'échange, montrent que s'engage tout d'abord une sorte de débat socio-cognitif. Mais les éléments proposés par 7B (surlignés en vert, figure 18) font référence de manière très imprécise aux caractéristiques de l'image, sans envisager les modalités de son obtention : « pour mieux voir » (12 :07 :30), « c'est pas très clair » (12 :11 :37), « nous c'est beaucoup plus clair » (12 :12 :47). Une seule fois, 7B fait appel à la notion de précision (« pour que ce soit plus précis. » (12 :11 :37)), mais il peut tout à fait s'agir de précision visuelle sur l'image, plutôt que de précision de signification de l'image en relation avec la notion de test statistique. L'emploi quasi systématique du verbe « être » et l'absence de mise en relation avec la construction de l'image nous amène à considérer les assertions de 7B plutôt comme des déclarations dogmatiques, que comme des arguments scientifiques.

Face au refus de modification opposé par 8B, 7B propose ensuite une référence à l'autorité de l'enseignant, mais sans reprendre les arguments qui avaient pu être échangés avec lui (12 :12 :29 ;

7B). C'est une argumentation d'autorité, une injonction dogmatique, sans plus aucune référence ni à l'image, ni à sa construction. D'ailleurs, les connecteurs logiques (conjonctions, prépositions, locutions conjonctives indiquant la cause, la conséquence, le but, et reliant deux propositions de manière logique, par exemple « pourquoi », « donc », « pour ») disparaissent rapidement de l'échange et les injonctions de 7B deviennent impératives (surlignées en jaune, Figure 24).

Le binôme 8B ne propose aucune argumentation, il oppose à 7B une stratégie de résistance dans le registre de la liberté individuelle (surligné rose, figure 18), du type « *chacun son choix* » (12 :12 :22), et fini par refuser la communication (12 :17 :52 ; « ...*laisse nous ...* »). Les mots appartenant au registre de l'effort et du sérieux (en vert, Figure 24) sont d'ailleurs nombreux en fin d'échange, où la négociation n'a plus rien de scientifique, mais fait plutôt référence au contrat didactique.

03/04/2009	12 :07 :12	8B	Explique pourquoi l'écart entre tes curseurs est si étroit ?
03/04/2009	12 :07 :30	7B	Pour mieux voir.
03/04/2009	12 :07 :55	8B	ok
03/04/2009	12 :09 :08	7B	C'est quoi vos curseurs à vous ?
03/04/2009	12 :09 :48	8B	c'est inf 30 et sup 100
03/04/2009	12 :11 :37	7B	Bin c'est pas très clair , il fallait être plus haut là où vous avez mis 30, pour que ce soit plus précis.
03/04/2009	12 :12 :12	8B	non c'est vous qui avez pris trop haut
03/04/2009	12 :12 :22	8B	chacun son choix
03/04/2009	12 :12 :29	7B	Bin non, c'est le prof qui vient de nous le dire.
03/04/2009	12 :12 :47	7B	et nous c'est beaucoup plus clair !!!
03/04/2009	12 :13 :03	8B	et bah on s'en fou
03/04/2009	12 :13 :18	7B	Bin recommencez !
03/04/2009	12 :13 :54	8B	Non
03/04/2009	12 :14 :06	7B	Ok.
03/04/2009	12 :14 :27		Échec de l'envoi du fichier "leboss_x_742752540189.xml" à 8B.
03/04/2009	12 :15 :45	7B	Refaites en augmentant le curseur inférieur !!!!
03/04/2009	12 :16 :10	8B	nn c tro long
03/04/2009	12 :16 :22	7B	=/ Feignasse !
03/04/2009	12 :16 :23	8B	et puis c'était notre choi de prendre ces valeur
03/04/2009	12 :16 :33	7B	Faute !!!!!
03/04/2009	12 :16 :40	7B	Choix y'a un x !
03/04/2009	12 :17 :21	8B	osef
03/04/2009	12 :17 :31	8B	c'est pas la question
03/04/2009	12 :17 :52	8B	on travaille, laisse nous si tu ne peux pas être sérieuse quelques secondes ja te prie
03/04/2009	12 :18 :34	7B	Bin si vous travaillez, refaites votre travail !!! Plus sérieusement bien sûr ^^

Pour 7B : **Argumentations simples** (pour...), **déclarations**, et arguments d'autorité, puis **injonctions**

Pour 8B : **résistance déclarative** puis **clôture de la communication**.

En **noir, gras et soulignés** : les connecteurs logiques (conjonctions, prépositions, locutions conjonctives indiquant la cause, la conséquence, le but, reliant deux propositions de manière logique).

En **orange**, les mots employés pour indiquer les bornes

En **vert** : mots appartenant au registre du travail, de la tâche, de l'effort, du sérieux

Figure 24 : clavardage entre les binômes 7B et 8B

Si l'échange a favorisé la formulation par 7B de l'importance de choisir une valeur élevée pour la borne inférieure, il n'a donc pas permis l'évolution des savoirs construits par le groupe 8B. Comme les mots employés par les deux binômes pour indiquer les bornes (en orange, Figure 24) font référence à des éléments visuels de l'interface (« curseur » ou « là ou ») ou à des valeurs numériques (« inf 30 », « valeur ») sans relation avec le test statistique, on peut penser que les élèves ne connaissaient pas leur signification. Ne maîtrisant pas bien le processus d'obtention des IRMf, ils ont du mal à l'évoquer pour le questionner.

→ Binômes 1B-2B : échange en relation avec le test statistique

La communication entre les binômes 1B et 2B ne s'est peut être pas réduite uniquement au clavardage, comme le laisse penser la remarque de 1B : « *on entend tout* » (12 :12 :38, Figure 25). Les échanges verbaux n'ayant pas été enregistrés, une partie des interactions ont peut-être été perdues.

Dans le clavardage, on trouve un nombre important de verbes d'action faisant référence à des choix de construction de la carte (surlignés en vert, Figure 25). Le verbe « prendre » est employé sept fois, ce qui indique bien la sélection entre différentes possibilités, et l'expression « *faire la carte* » (12 :11 :21, 1B), montre bien que pour ces élèves, la représentation de la carte d'activation fonctionnelle qui s'est construite est celle d'une image fabriquée.

Pour indiquer les bornes d'affichage (en orange, Figure 25), les élèves commencent par le mot « *contraste* » (12 :04 :26), qui n'est pas pertinent, puis on retrouve les termes de références à l'interface (« *curseur* », « *en haut* », « *en bas* »), le mot « *valeur* », et des valeurs numériques en très grand nombre, puisque l'objet de l'échange est essentiellement le choix des bornes d'affichage.

Il est intéressant de remarquer que les élèves semblent faire le lien entre les bornes d'affichage et le risque d'erreur intervenant dans le test statistique dès la 9^e minute de l'échange (surlignage jaune à partir de 12 :09 :02, Figure 25) en introduisant la notion de « *marge d'erreur* ». On peut noter que les deux connecteurs logiques employés appartiennent à cette partie de l'échange. Même si il existe parfois un flou dans l'expression du risque de se tromper, sous forme de pourcentage (« *notre truc de %* » « *70% de juste* », « *70% d'erreur* » et « *70%* » (de 12 :13 :44 à 12 :15 :09), aucune référence n'est jamais faite à la nature du risque ou de l'erreur), les élèves semblent avoir compris que plus la borne inférieure est élevée, moins le risque d'erreur est important. Ils affirment que le choix de la borne inférieure est « *important* » (12 :13 :33 ; 1B), et se questionnent sur la relation mathématique entre les valeurs des bornes et du risque : « *si on pren 32 100, se sera combien notre truc de %* » (12 :13 :44 ; 2B). Le binôme 1B propose une approximation à partir d'informations obtenues auprès d'un enseignant observateur : « *bah le monsieur m'a dit qu'avec 70 on avait a peu près 70% de juste, donc a 30 y doit y avoir 70% d'erreur* » (12 :14 :47; 1B), manipulant à la fois les relations entre borne d'affichage et risque, et entre risque (« *erreur* ») et confiance (« *juste* »). Le binôme 2B ne se satisfait pas de cette affirmation. Il exprime le besoin de maîtrisant l'outil mathématique, pour l'utiliser dans sa réflexion : « *mai comment on fai le calcule, pour savoir* » (12 :15 :17 ; 2B). On peut donc penser que pour ces deux binômes, la carte fonctionnelle a une signification statistique. La représentation qu'ils en ont construite semble bien avoir un statut de modélisation par son caractère construit, simplifié et sa fonction d'interprétation.

Il leur paraît alors important de choisir les mêmes bornes pour leurs deux images (12 :10 :08 et 12 :11 :49), et ils appliquent un protocole qui consiste à diminuer la valeur de la borne inférieure jusqu'à l'apparition d'une zone colorée sur l'image (12 :12 :16 ; 12 :13 :33 et 12 :15 :43). À ce moment là, on peut repérer un obstacle concernant la visualisation 3D du cerveau. En effet, les deux binômes n'ont pas modifié les coordonnées spatiales (voir annexe 5B), ce qui veut dire qu'ils n'ont pas exploré la profondeur des coupes pour trouver la zone où la différence d'irrigation est la plus significative. C'est pour cette raison qu'ils en sont réduits à diminuer de façon importante la valeur choisie pour la borne d'affichage inférieure. Encore une fois, la situation ne permettant pas aux élèves d'évaluer la pertinence de l'image, elle ne leur permet pas de résoudre cet obstacle.

03/04/2009	12 :04 :26	1B	vous avez pris combien de contraste?
03/04/2009	12 :04 :57	1B	au niveau du curseur du haut
03/04/2009	12 :05 :02	2B	deux
03/04/2009	12 :05 :09	1B	lol
03/04/2009	12 :05 :16	1B	ou pas
03/04/2009	12 :05 :16	2B	atten
03/04/2009	12 :05 :40	2B	et vouo c combien
03/04/2009	12 :05 :41	1B	nous on a pris 70 et 100
03/04/2009	12 :05 :59	1B	'fin 70 en haut et 70 en bas
03/04/2009	12 :06 :04	1B	100
03/04/2009	12 :06 :06	1B	*
03/04/2009	12 :06 :10	1B	en bas
...
03/04/2009	12 :08 :25	2B	32 en haut
03/04/2009	12 :08 :31	2B	100 en bas
03/04/2009	12 :09 :02	1B	ok, mais ca laisse pas mal de marge d'erreur
03/04/2009	12 :09 :47	2B	ouai
03/04/2009	12 :10 :08	2B	tu prendre le meme numero
03/04/2009	12 :10 :12	1B	avec 70 et 100 c'est moins importqnt
03/04/2009	12 :10 :20	1B	important*
03/04/2009	12 :10 :46	2B	on pren 70
03/04/2009	12 :10 :52	1B	ok
03/04/2009	12 :11 :21	1B	mais là on doit faire la carte à deux non?
03/04/2009	12 :11 :31	2B	on peu pas prendre 70 il y a rien
03/04/2009	12 :11 :31	2B	rien
03/04/2009	12 :11 :39	2B	oui mai avec la notre aussi
03/04/2009	12 :11 :49	2B	donc tu prendre les meme donné
03/04/2009	12 :12 :16	1B	oui , bn prend moi alors mais faut pas avoir de trop basse valeur
03/04/2009	12 :12 :38	1B	on entend tout
03/04/2009	12 :13 :33	1B]	oui c'est important , mais on peut encore descendre; essayez avec 60 et 50
03/04/2009	12 :13 :44	2B	si on pren 32 100, se sera combien notre truc de %
03/04/2009	12 :14 :47	1B	bah le monsieur m'a dit qu'avec 70 on avait a peu près 70% de juste
03/04/2009	12 :15 :09	1B	donc a 30 y doit y avoir 70% d'erreur
03/04/2009	12 :15 :17	2B	mai comment on fai le calculé
03/04/2009	12 :15 :27	2B	pour savoir
03/04/2009	12 :15 :43	1B	alors montez jusqu'à ce que vous pouvez
03/04/2009	12 :16 :07	1B	bah c'est le curseur du haut sur celui du bas
03/04/2009	12 :16 :16	1B	donc 70/100
03/04/2009	12 :16 :19	1B	70%
03/04/2009	12 :19 :23	1B	?
...

En orange, les mots employés pour indiquer les bornes

En gras et soulignés : les connecteurs logiques

Surligné vert : les verbes actifs faisant référence à des choix dans la construction de la carte

Surligné jaune : les références au risque d'erreur correspondant au test statistique

Surligné bleu : obstacle de visualisation 3D (aucune modification des coordonnées spatiales)

Figure 25 : extrait du clavardage des binômes 1B et 2B concernant le choix des bornes d'affichage

V.4.2. Échanges concernant la présentation de la carte d'activation fonctionnelle

Différentes modifications concernant le titre et la légende de la carte d'activation fonctionnelle ont été réalisées au cours de la phase de communication entre les binômes 7B-8B, 5A-6A et 3B-5B (Tableau 8). Une remarque écrite sur la fiche réponse du groupe 6B apporte aussi des informations à propos de cette situation d'échange.

V.4.2.1. Binômes 7B-8B

Comme nous l'avons écrit précédemment, le clavardage entre ces binômes a surtout porté sur le choix des bornes d'affichage, sans aboutir à leur modification. Par contre, les valeurs choisies pour les bornes semblent avoir été ajoutées à la légende des diapositives de 8B durant l'échange. Elles

ont donc été repérées par ce groupe comme des attributs variables d'une carte à une autre, et identifiées comme des informations à joindre à l'image construite. On peut voir sur la Figure 26 que le binôme 8B a inclus la carte fonctionnelle de 7B dans son diaporama, en lui appliquant sa propre présentation (titre et légende). A cette occasion, une erreur qui n'est peut-être qu'un oubli a été introduite dans la légende.

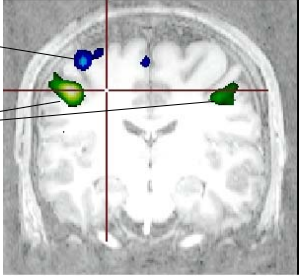
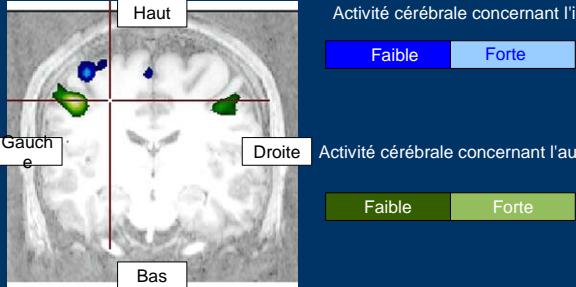
<p>Diapositive produite par le binôme 7B</p> <p>D'après le clavardage, on peut penser que les indications des bornes d'affichage (en bas à droite) étaient déjà présentes sur la diapositive avant l'échange.</p>	 <p style="text-align: center;"><u>Coupe coronale</u></p> <p>Index droit : Inf : 56 Sup: 100 Langue : Inf : 69 Sup : 100</p>
<p>Diapositive n° 5 du binôme 8B</p> <p>On retrouve la carte construite par 7B, dans un style de présentation propre à 8B (voir diapositive 3 du binôme 8B à la figure 16). On peut remarquer que si le titre et les indications sous l'image de la coupe sont corrects, la légende concernant la zone du corps stimulée correspondant à la couleur verte n'a pas été modifiée (« auriculaire » au lieu de « langue »). D'après le clavardage, on peut penser que les indications concernant les bornes d'affichage ont été ajoutées en cours d'échange.</p>	 <p style="text-align: center;">Index droit : Inf : 56 Sup: 100 Langue : Inf : 69 Sup : 100</p> <p style="text-align: center;"><u>Activité cérébrale pour la langue et l'index droit vue d'une coupe coronale</u></p>

Figure 26 : Insertion de la carte fonctionnelle construite par 7B dans la présentation de 8B

V.4.2.2. Binômes 5A-6A

Les légendes ont été modifiées par les deux binômes suite à l'échange. Il semble que 5A ait indiqué « zones d'influences sanguines » [sic] en légende, après que 6A lui ait écrit « on ne voit pas ce qui fait les zones d'afflux sanguin » [sic], et que 6A ait repris en légende « zones d'influences sanguine » [sic] (voir annexe 9A pour le clavardage complet et Figure 22 pour l'ajout de la légende de 6A). Le questionnement du binôme partenaire face à la carte produite amène donc les élèves à porter de nouvelles informations en légende, pour améliorer sa compréhension. La réalisation effective d'un échange communicationnel impliquant la carte est un moyen de valider les stratégies de présentation de l'image, et de mettre en relation le référent et le signifiant en tenant compte du destinataire.

V.4.2.3. Binômes 3B-5B

Suite à une erreur d'organisation, les binômes 3B et 5B ont réalisé leurs premières cartes pour les deux mêmes zones du corps stimulées : l'index droit et la langue. S'ils avaient choisi des bornes d'affichages très voisines, 5B avait ajusté les coordonnées spatiales alors que 3B s'était satisfait des coordonnées affichées par défaut (voir Annexe 5B). On peut en effet remarquer sur les diapositives produites (Figure 27) qu'on voyait bien deux zones correspondant à la stimulation de la langue sur la carte de 5B, alors que celle de 3B ne présentait qu'une seule zone spécifique de la langue à gauche.

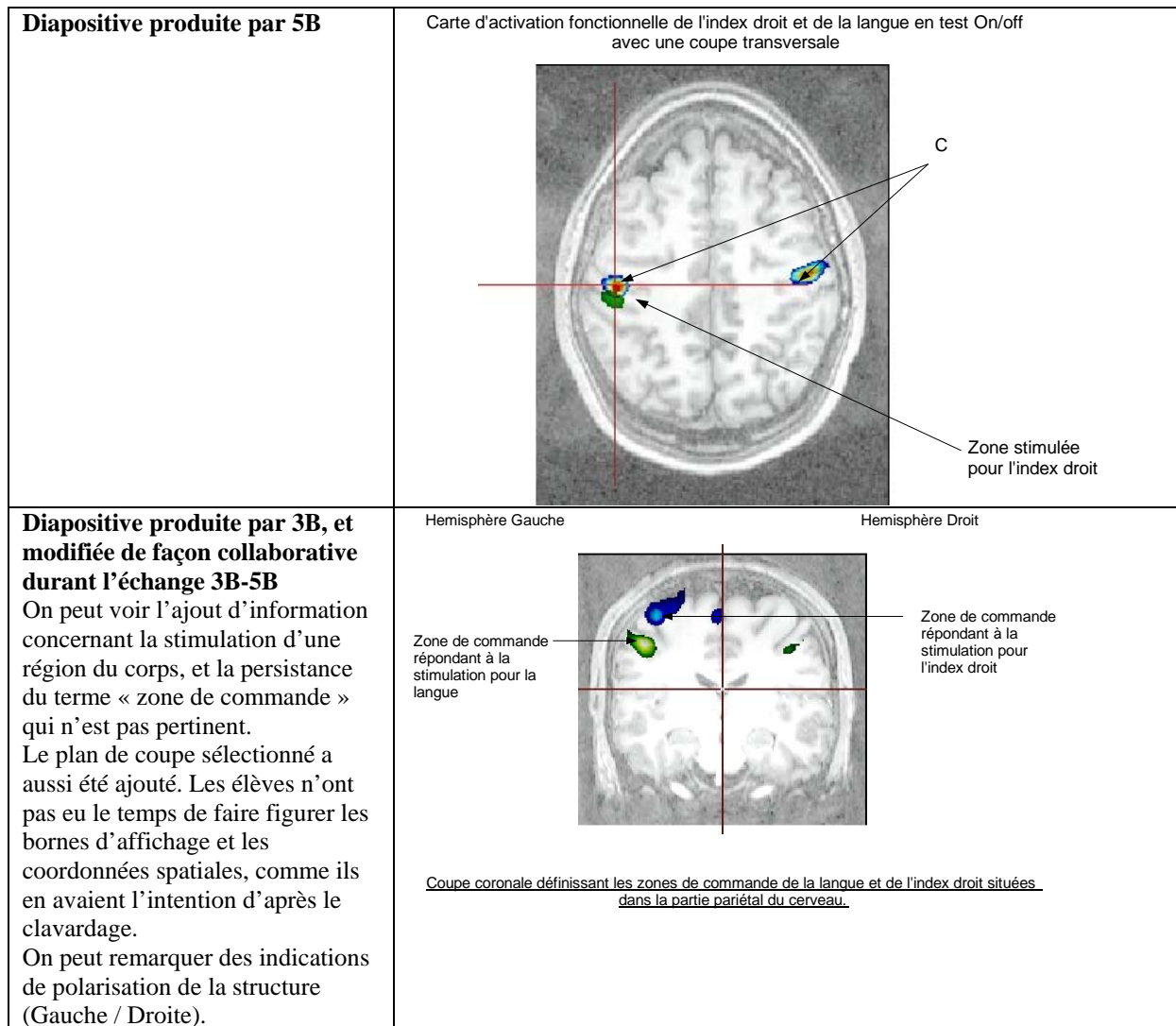


Figure 27 : diapositives produites par les binômes 3B-5B

Durant leur interaction, les deux groupes ont assez vite choisi de travailler ensemble sur la diapositive produite par 3B, sans passer par une comparaison des deux diapositives. L'échange amenant cette décision (surligné en vert, figure 22) montre que la décision a été prise sans vraiment comparer les 2 cartes, pour déterminer leur pertinence. Aucun argument n'est avancé pour le choix de la diapositive de 3B. Le binôme 5B considère simplement que la sienne est « moins top » (12 :11 :53), posant un jugement peut-être esthétique.

Date	Heure	De	Message
03/04/2009	11 :57 :52	5B	je vous envoi mon machin
03/04/2009	11 :57 :52	5B	:)
03/04/2009	11 :58 :19		5B a envoyé 5B-carte1v1.odp
03/04/2009	11 :59 :03	5B	clique sur ta fenetre orange !
03/04/2009	12 :00 :01		Vous avez bien reçu le fichier C :\Documents and Settings\util\Mes documents\Mes fichiers reçus\5B-carte1v1.odp envoyé par 5B.
03/04/2009	12 :03 :32	5B	enfin ! >.<"
03/04/2009	12 :03 :32	5B	envoyez moi votre truc
03/04/2009	12 :03 :52	5B	...
03/04/2009	12 :04 :02		3B a envoyé D :\Stock6b\3B-carte 1V1.odp
03/04/2009	12 :04 :12		Le transfert de "3B-carte 1V1.odp" est terminé.
03/04/2009	12 :06 :55	3B	on rajoute oik ?
03/04/2009	12 :07 :23	5B	on peut rajouter sur pour les zone de commandes de la langue par exemple qu'elle réponde a la stimulation, non?
...
03/04/2009	12 :08 :27	5B	sur ta légende t'as mis : "Zone de commande de l'index droit"
03/04/2009	12 :08 :31	3B	si
03/04/2009	12 :08 :54	5B	on peut rajouter : répondant au stimulation pour l'index droit
03/04/2009	12 :09 :04	5B	sa simplifie un pe ule "zone de commande"
03/04/2009	12 :09 :32	5B	Z'en pensez quoi ? Idem
03/04/2009	12 :10 :00	3B	tu veux remplacer zone de commande par zone de commande répondant à la stimulation
03/04/2009	12 :10 :04	3B	?
03/04/2009	12 :10 :39	5B	Yah tout juste august
03/04/2009	12 :10 :52	3B	da
03/04/2009	12 :10 :56	3B	why not
03/04/2009	12 :11 :05	5B	zone de commande par zone de commande répondant à la stimulation pour l'index droit/ou langue
03/04/2009	12 :11 :06	3B	qui s'en charge ?
03/04/2009	12 :11 :11	5B	genre le bilingue U_u'
03/04/2009	12 :11 :26	3B	on garde quelle carte ?
03/04/2009	12 :11 :48	5B	euh... Franck dit : fait le toi avec ta carte
03/04/2009	12 :11 :53	5B	la notre est moins top
03/04/2009	12 :12 :01	3B	okay francky
03/04/2009	12 :12 :32	5B	on peut mettre aussi les coupes qu'on a pris pour la légende en^plus que dans le titre
03/04/2009	12 :13 :20	5B	et on pourrait indiquer les coordonnées :P
03/04/2009	12 :13 :22	3B	fait
03/04/2009	12 :13 :42	5B	bien
03/04/2009	12 :13 :43	3B	vous avez pris les quelles ?
03/04/2009	12 :15 :03	3B	nous 48 - 100
03/04/2009	12 :15 :12	3B	et 75 - 100
03/04/2009	12 :15 :27	5B	wooch
03/04/2009	12 :15 :36	5B	attend j'te sors les miennes
03/04/2009	12 :15 :40	3B	da
03/04/2009	12 :16 :06	5B	61-142-108-79
03/04/2009	12 :16 :18	3B	a ok
03/04/2009	12 :16 :25	3B	j'parlai pas de celle la
03/04/2009	12 :16 :27	3B	mais ok
03/04/2009	12 :16 :50	5B	les quelles coordonnées tu pouvais parler ?
03/04/2009	12 :17 :00	3B	tu sais quoi je te renvoie le fichier modifié p tu le pour que tu le complètes
...

En orange, les mots faisant références à la carte ou aux présentations *POWERPOINT*

En vert et gras : les mots faisant références à l'ajout ou l'extraction d'informations sur les cartes

En gras soulignés : les mots « titre » et « légende »

Surligné jaune : échange concernant l'ajout d'information sur la stimulation

Surligné vert : échange concernant le choix de la carte d'un des binômes pour la production collaborative d'une carte commune

Surligné bleu : échange concernant l'ajout d'informations spatiales : plan de coupes et coordonnées spatiales

Surligné rose : références faites aux bornes d'affichage

Surligné rouge : échange mettant en évidence l'imprécision du terme « coordonnées »

Figure 28 : extrait du clavardage des binômes 3B-5B concernant la légende de la carte

L'objectif de la collaboration est surtout l'apport d'informations complémentaires à la diapositive choisie : dans le clavardage, les mots faisant références à l'ajout d'informations sur les cartes sont assez nombreux et variés (en vert, Figure 28). La carte semble donc être considérée par ces binômes comme d'autant plus riche que l'image est accompagnée de plus d'informations. La légende et le titre ont un statut fonctionnel à part entière, leurs noms sont cités 3 fois (soulignés, Figure 28) et le but affiché est de les « compléter » (12 :17 :00).

Il est très intéressant de remarquer que l'extraction d'informations depuis l'interface du logiciel est aussi envisagée par les élèves (« attend j'te sors les miennes » (12 :15 :36 ; 5B)), qui manipulent donc dans les deux sens la relation entre référent et signifiant pour construire le signifié de la carte. On peut noter à ce propos que le lexique utilisé pour faire référence aux présentations *POWERPOINT* produites évolue au cours de l'échange : de « truc » ou « machin » au début, on passe à « carte » et « fichier » au fur et à mesure du travail sur la légende (mots en orange, Figure 28). L'augmentation de la précision du vocabulaire utilisé signifie peut-être que travailler et communiquer sur la carte fonctionnelle et sa présentation sémiotique pourrait aider les élèves à préciser son statut.

Les informations ajoutées par les élèves à la carte concernent le protocole d'obtention de l'image (notion de stimulation, surligné jaune, Figure 28), le choix des bornes d'affichage (surligné rose, Figure 28) et des éléments spatiaux tels que l'orientation du plan de coupe et les coordonnées spatiales (surligné bleu, Figure 28). On peut remarquer cependant que la formulation « zone de commande » proposée par 3B, qui évoque plus une région de contrôle moteur qu'une zone activée par des entrées sensorielles, n'est pas corrigée par 5B qui se contente d'ajouter la référence à une stimulation sensorielle (Figure 27).

Une confusion se produit dans le clavardage à propos du terme « coordonnées » : 5B emploie ce mot pour indiquer les bornes d'affichage et 3B répond en donnant les coordonnées spatiales. Le binôme 5B s'aperçoit de l'erreur, mais 3B ne comprend pas le problème (surligné rouge, Figure 28). Cet échange met donc l'accent sur l'importance de la précision des mots employés dans une légende, et pourrait attirer l'attention des élèves sur le fait que le signifié dépend aussi du destinataire. Il est regrettable que les élèves n'aient pas eu le temps d'ajouter les valeurs en question sur leur diapositive car la formulation choisie aurait pu apporter des renseignements complémentaires sur leur perception de ce phénomène important dans le cadre d'une éducation à l'image.

V.4.2.4. Binômes 4B-6B

Le clavardage de ces deux binômes a été réduit et focalisé surtout sur la résolution de problèmes d'échange de fichiers. Cependant, une remarque écrite par un élève du binôme 6B sur la fiche réponse est intéressante :

« Les coordonnées utilisées par rapport au curseur se sont avérées importantes pour avoir la vraie image vue par notre camarade »

Les élèves de ce binôme semblent avoir voulu utiliser les informations fournies sur la carte envoyée par leurs partenaires, pour construire une nouvelle image, et se sont alors aperçus de l'influence du choix des coordonnées spatiales et/ou des bornes d'affichage sur l'aspect de la carte construite. Cet apprentissage ne s'est pas traduit par l'ajout de ces informations dans la légende des diapositives produites, faute de temps peut-être, car ces deux binômes ont subi de nombreux problèmes techniques. La remarque écrite sur la fiche réponse en fin de séance montre cependant l'importance accordée par l'élève à cette « découverte ». Elle paraît indiquer que la situation de communication lui a permis de construire une représentation de carte fonctionnelle IRM construite par ces auteurs,

et d'identifier certains paramètres de sa construction comme des informations importantes pour la compréhension de l'image.

V.4.3. Retour sur l'hypothèse 4

Produire une carte d'activation fonctionnelle dans un but de communication avec des pairs pourrait permettre aux élèves de valider leurs stratégies de construction et de présentation de cette carte.

Malgré le peu de temps disponible pour cette activité durant la séance, la situation de communication collaborative entre binômes semble avoir été très fructueuse. Ses apports paraissent divers d'un binôme à l'autre.

Le fait de communiquer à propos de la carte d'activation fonctionnelle construite, et d'avoir à collaborer pour en produire une nouvelle, a souvent amené les élèves à modifier ou à projeter de modifier certaines étapes de la construction. Les modifications réalisées n'ont cependant pas toujours été pertinentes, et la richesse des échanges a dépendu des connaissances déjà construites avant l'interaction. Cette situation n'offre donc pas obligatoirement aux élèves les moyens d'évaluer leurs stratégies de construction de la carte. Les résultats montrent cependant que la confrontation avec des images construites par d'autres élèves stimule le questionnement et la remise en cause de la carte préalablement produite. De plus, la situation de communication semble avoir permis la formulation par plusieurs binômes des stratégies choisies et l'argumentation des choix réalisés. Dans ce sens, elle a fourni aux élèves l'occasion de manipuler les attributs de modélisation qui correspondent à la construction de l'image IRM et mettent en relation son référent et son signifiant.

L'élaboration de la carte d'activation fonctionnelle dans un objectif de communication a aussi permis à certains élèves de valider des stratégies de présentation de l'image et de se questionner sur les informations qu'il faut joindre à l'image pour qu'elle puisse être comprise ou reconstruite. Ils ont ainsi expérimenté certaines des relations entre le référent de l'image, son signifiant et son signifié, ce qui a pu contribuer à faire évoluer leurs représentations des IRM.

Pour ces différentes raisons, la situation de communication collaborative mise en place nous paraît être très intéressante. L'objectif de production d'une nouvelle carte commune par deux binômes à destination d'élèves n'ayant pas utilisé le logiciel aurait peut-être permis de pousser plus loin le travail sur le signifiant et le référent de l'IRM. Mais le temps a manqué pour explorer cette piste.

VI - DISCUSSION

Notre travail avait pour objectif l'étude des modalités possibles pour une éducation à l'image IRM fonctionnelle, en tant que modélisation de l'activité cérébrale. L'expérimentation utilisant le logiciel *EDUANATOMIST* et des images de la banque de données *NEUROPEDA*, s'est déroulée dans une classe de première S dans le cadre de l'enseignement des neurosciences.

La séquence proposée comprenait des activités préliminaires de traitement statistiques de données de mesure et de découverte de l'anatomie cérébrale à l'aide du même logiciel. Nous avons expérimenté une situation de construction collaborative d'une carte cérébrale d'activation fonctionnelle concernant la somesthésie¹³, faisant intervenir des interactions à distance entre les élèves par MSN. La méthodologie utilisée et les résultats obtenus seront discutés dans ce paragraphe.

VI.1. Discussion de la méthodologie

Le travail collaboratif pluridisciplinaire entre enseignants, chercheurs et statisticiens a permis d'intégrer nos hypothèses de recherche dans la conception des situations, en s'assurant de l'acceptabilité des séances produites ainsi que de leur validité du point de vue de l'enseignement de la statistique. La première difficulté méthodologique qu'on peut citer est donc le changement de posture que m'a demandé ce travail. En effet, mon implication dans la conception de la séance pourrait m'avoir amenée à regarder les résultats avec trop de subjectivité. C'est un élément que j'ai essayé de garder à l'esprit, et de contrebalancer en soumettant ce travail à quelques personnes extérieures à sa conception.

La limite la plus évidente de notre méthodologie est le nombre restreint d'élèves participants. Les difficultés observées pour le premier demi-groupe de TP ayant nécessité des modifications de la situation pour le deuxième demi-groupe, les effectifs réellement étudiés dans chacune des conditions se sont réduits à 8 binômes d'élèves. Aucun traitement statistique des données obtenues ne peut donc être réalisé, et les pourcentages exprimés dans l'analyse des résultats ne sont donnés qu'à titre indicatif. Ce travail correspond à une approche qualitative, sans visée généralisante.

Une autre limite concerne l'approche des représentations des élèves au sujet des IRM par l'analyse de leurs productions et des traces de leur activité. Pour des raisons de taille du corpus, et parce que le repérage des obstacles rencontrés par les élèves au cours de l'apprentissage nous paraissait plus important, les représentations des IRM ont été considérées dans le temps restreint de la séance, par le suivi d'indices, sans évaluation *a priori* et *a posteriori*. Des entretiens suite à la lecture d'articles de vulgarisation scientifique utilisant des IRMf, construits sur un modèle voisin de ceux réalisés par Clément (Clément, 2001), pourraient être réalisés avant et après la séance pour mettre en évidence plus directement des conceptions préexistantes des élèves et leurs modifications. Même si une seule séance n'est pas forcément suffisante pour modifier durablement les représentations, une approche de ce type pourrait être développée pour compléter notre travail. La complexité intrinsèque des images IRM devra cependant être gardée à l'esprit pour mener ce travail.

En ce qui concerne le suivi du travail des élèves en cours d'apprentissage, la sélection nécessaire des éléments du corpus implique forcément une vision partielle. L'absence de dispositif de traçage de l'activité de l'utilisateur par le logiciel *EDUANATOMIST*, nous a privés de l'accès à la continuité de celle-ci. Nous avons choisi de sauvegarder plusieurs étapes du travail des élèves, mais certains paramètres sont presque inaccessibles. Par exemple, il est difficile de reconstituer les réglages des bornes d'affichage et des coordonnées spatiales correspondant à une image insérée dans une

¹³ Somesthésie : sensibilité tactile assurée par des récepteurs de la peau.

diapositive, les éléments de l'interface n'étant plus disponibles. La poursuite du travail pourrait intégrer l'analyse de certains passages d'enregistrements vidéo de l'écran de l'ordinateur pour obtenir plus de précision.

L'étude des échanges communicationnels entre les élèves a été réalisée principalement par l'analyse des clavardages, qui se sont révélés très intéressants pour une analyse dynamique de l'apprentissage. Les élèves se sont révélés très à l'aise avec ce mode de communication. Du point de vue méthodologique, l'analyse des enregistrements audio est difficile dans le cadre d'un master, parce qu'elle demande beaucoup de temps. L'utilisation de *MSN* a permis d'analyser les 5 échanges disponibles dans un temps compatible avec notre étude. Cette approche originale pourra être à nouveau utilisée. Cependant, elle présente aussi des limites :

- L'étape préliminaire de construction collaborative de la carte par chaque binôme impliquant des choix et des arbitrages n'est pas appréhendée.
- Les deux élèves de chaque binôme sont réduits à un seul intervenant dans la communication. Il est impossible de suivre leurs discussions, de déceler d'éventuels désaccords et d'appréhender la construction commune de leur argumentation.

Dans la perspective de la poursuite de ce travail, des enregistrements audio et vidéo réalisés durant la séance pourraient compléter le corpus pour une deuxième phase d'analyse de la situation. C'est en croisant les différents types de données que notre analyse pourra être enrichie et validée.

VI.2. Discussion des résultats

Notre travail a montré que le logiciel *EDUANATOMIST* permet la construction de cartes cérébrales d'activation fonctionnelle par les élèves, mais aussi que cette tâche peut se heurter à différents obstacles liés aux choix effectués dans la conception de l'interface du logiciel, à la maîtrise de connaissances de statistique et à la capacité de visualisation en 3 dimensions des élèves. Il met en évidence la richesse de la dimension communicationnelle de la situation, tant pour la formulation des connaissances construites durant la phase de production de l'image, que pour l'appréhension des relations entre le référent de l'IRM, son signifiant et son signifié. Il montre qu'il manquait dans le *milieu* des éléments permettant aux élèves d'évaluer par eux-mêmes les stratégies qu'ils mettent en œuvre. L'étude met également en évidence plusieurs variables didactiques importantes pour la situation étudiée, telles que le nombre et la nature des fichiers IRM à disposition des élèves, les valeurs des bornes d'affichage et des coordonnées spatiales affichées par défaut, le temps accordé à l'étape de communication à distance et le destinataire de la carte construite. Nous discutons ici des éléments qui paraissent favoriser l'apprentissage du statut de l'IRMf, ainsi que des difficultés et des obstacles observés. Nous apportons aussi des propositions pour l'amélioration du logiciel *EDUANATOMIST*, de la banque *NEUROPEDA* et de la séquence proposée.

VI.2.1. Obstacles liés à la compréhension du traitement statistique des données

VI.2.1.1. Choix des bornes d'affichage

Nous avons observé que le choix des bornes d'affichage inférieure et supérieure de la palette est une étape clé de la construction de la carte d'activation fonctionnelle. Si ce choix n'est pas pertinent, l'image construite n'a pas de signification scientifique, et pourtant, elle semble en avoir une. Cette caractéristique s'est révélée être un obstacle majeur de la situation que nous avons expérimentée. Mais c'est justement parce qu'elle constitue un obstacle que cette étape peut être laissée à la charge des élèves, pour qu'ils se construisent une représentation pertinente du processus de modélisation dont sont issues les IRMf. Si cet objectif didactique est choisi, il nous paraît important d'attirer l'attention des élèves sur le choix des bornes d'affichage, en leur demandant explicitement d'effectuer ce réglage (les valeurs par défaut proposées par le logiciel et l'ergonomie générale

autour de cette fonctionnalité de réglage peuvent avoir pour cela un rôle d'incitateur), et en leur fournissant les informations nécessaires pour le réaliser. Dans le cas où une activité préliminaire d'utilisation d'un test statistique a été effectuée, les ressources construites à cette occasion pourraient être tenues à disposition des élèves lors de l'activité de construction de la carte, pour être réinvesties. Une attention particulière devrait alors être portée à l'explicitation de la relation entre l'échelle statistique de l'interface du logiciel et la statistique de test calculée et on pourrait demander aux élèves d'argumenter leurs choix.

Dans le cas où l'obstacle de compréhension du traitement statistique des données paraît trop important, pour des élèves de collège par exemple, il semble que la tâche de réglage des bornes d'affichage doive être prise en charge entièrement par l'enseignant, en indiquant aux élèves les valeurs à sélectionner. Ainsi, le professeur sera certain que les cartes construites seront pertinentes, et les élèves pourront se concentrer sur l'exploration spatiale du cerveau en fonctionnement. On peut aussi envisager le développement d'une version du logiciel affichant directement les images en tenant compte des bornes d'affichage pertinentes, et ne laissant pas la possibilité de les modifier.

VI.2.1.2. Manipulation de l'outil statistique

Les observations restreintes menées lors de l'activité préliminaire d'utilisation d'un test statistique ont montré que les élèves peuvent manipuler ce type de test et en comprendre l'utilité. Cette approche statistique nous paraît essentielle pour l'appréhension de la plupart des résultats scientifiques actuels dans le domaine de la biologie. Cependant, nos résultats montrent aussi que l'apprentissage de l'outil statistique n'est simple ni pour les élèves, ni pour les professeurs. L'activité que nous avons proposée se doit donc d'être améliorée, et la formation des enseignants doit être envisagée. Ce travail est actuellement en cours en collaboration avec Valérie Fontanieu et Claudine Schwartz, statisticiennes, dans le but d'une publication sous forme de ressources à destination des enseignants sur les sites STATISTIX¹⁴ et ACCES¹⁵. Il s'inscrit dans l'amélioration de l'acceptabilité du logiciel par la production de ressources pour la formation des enseignants et pour la classe, en tenant compte des spécificités et des complémentarités entre les disciplines.

VI.2.2. Obstacles liés aux capacités de visualisation en 3D

Nos données ont montré que plusieurs groupes d'élèves n'ont pas modifié les coordonnées spatiales des images affichées, ce qui signifie qu'ils n'ont pas exploré le volume cérébral à la recherche des zones spécifiquement activées et qu'ils se sont contentés des coupes affichées par défaut. Cette stratégie peut constituer un obstacle, qui doit être considéré en relation avec l'obstacle de réglage des bornes d'affichage précédemment décrit. En effet, l'absence d'exploration du volume cérébral peut être la conséquence d'un choix non pertinent des bornes d'affichage : si celles-ci sont mal réglées, des zones colorées peuvent apparaître sur les coupes s'affichant par défaut dès l'ouverture de l'image et laisser croire aux élèves que la coupe observée contient la région recherchée. Point n'est besoin d'explorer le cerveau si l'on se satisfait déjà de l'image affichée. Mais l'absence d'exploration du volume cérébral peut aussi être la **cause** d'un mauvais réglage des bornes d'affichage. Nous l'avons observé pour deux binômes qui avaient bien compris la signification statistique des bornes d'affichage, mais qui n'ont pas songé à explorer l'ensemble du volume du cerveau. Ne voyant apparaître aucune coloration avec des bornes d'affichage correctement choisies, ils ont été contraints de diminuer la valeur de la borne inférieure jusqu'à ce qu'une zone colorée soit

¹⁴<http://www.statistix.fr/> site de ressources, de partage et de mutualisation pour l'enseignement de la statistique (responsable de publication, Claudine Schwartz)

¹⁵<http://accès.inrp.fr/accès> site de ressources pour l'actualisation des connaissances des enseignants en Sciences de la Vie et de la Terre (équipe ACCES, INRP)

visible sur les coupes présentées par défaut. La carte obtenue n'a pas la signification que les élèves lui attribuent. Dans ce cas, l'obstacle semble être en relation avec la capacité de pouvoir se représenter le cerveau en 3 dimensions. On peut formuler l'hypothèse que certains élèves ne se représentent pas l'encéphale comme un objet présentant un volume, où comme s'ils n'envisageaient pas que ce volume pouvait être exploré à l'aide du logiciel. Cet obstacle déjà repéré dans des observations antérieures avait été anticipé, et l'activité préliminaire de repérage anatomique était proposée pour le travailler. Il serait intéressant d'analyser les traces produites par les élèves lors de cette activité pour les mettre en relation avec les différentes stratégies d'exploration spatiale mises en œuvre.

Une solution pour aider les élèves à surmonter cette difficulté pourrait consister à demander explicitement aux élèves d'explorer le volume cérébral pour déterminer les coordonnées spatiales propices à la visualisation de la région spécifiquement activée. Si la tâche est clairement demandée, il y a moins de risque qu'elle soit négligée. De nouveau, l'interface du logiciel pourrait être incitative sur cette exploration et l'ajout de « bulles d'aide » rappelant les fonctionnalités des outils d'exploration spatiale, ou l'affichage en début de session d'invitations à les faire fonctionner sont aussi des pistes qui permettraient d'éviter cet écueil. Des rétroactions en cas de non modification des coordonnées spatiales pourraient aussi être envisagées, par exemple, lors de la sauvegarde des images affichées.

Cet obstacle pose aussi la question de l'articulation de l'usage du logiciel avec un travail sur le réel. Une activité sur la représentation du cerveau en trois dimensions pourrait être réalisée en amont de l'utilisation du logiciel, passant par la dissection d'encéphale, l'observation de maquette de cerveau isolé ou positionné dans la tête sur un écorché. Des activités de production de coupes sériées à partir d'un organe ou d'une maquette d'organe, et de reconstitution du volume d'un organe à partir de coupes sériées ont déjà été proposées (Clément, 1996) pour aider les élèves à faire la relation entre les coupes planes et le volume 3D. Le logiciel *EDUANATOMIST* permet aussi d'aborder la visualisation du cerveau en 3D, en affichant le contour du volume des hémisphères cérébraux en superposition des coupes, et en faisant pivoter l'ensemble pour voir où se situe la coupe dans l'encéphale. Cette fonctionnalité, absente du logiciel de recherche *Anatomist* auquel *EDUANATOMIST* est adossé, a été ajoutée suite à une expérimentation réalisée en classe de 1^o (Ranc, Faverjon, Molinatti et Jauzein, 2007). L'activité préliminaire de repérage anatomique que nous avons proposée intégrait l'utilisation de cet outil (voir Annexe 2A). Le fait de diriger les mouvements des structures observées à l'aide de la souris, en associant des perceptions motrices aux perceptions visuelles, pourrait avoir une influence bénéfique sur la construction d'une représentation mentale tridimensionnelle du cerveau. Cet effet, nommé « *tuning effect* » par Lindgren et Schwartz (Lindgren et Schwartz, 2009), est basé sur l'ajustement automatique des liens entre les perceptions et l'activité motrice. D'après les auteurs, le recrutement simultané des systèmes moteur et visuel durant l'apprentissage d'une structure spatiale favorise la construction d'une représentation mentale de cette structure, sa mémorisation et son utilisation ultérieure.

Un autre élément a pu participer à la confusion entre les représentations tri- et bidimensionnelle du cerveau. Il s'agit du vocabulaire employé durant la séance. En effet, nous avons choisi d'appeler « carte d'activation fonctionnelle » certains fichiers IRMf correspondant à des images 3D du cerveau et visualisable avec *EDUANATOMIST*. Or, le terme de « carte » est associé dans la vie courante, en géographie et en géologie à une image bidimensionnelle, ce qui a pu influencer les représentations construites par les élèves à propos des images observées. De plus, nous avons demandé aux élèves la production d'une « carte d'activation fonctionnelle », sous forme d'une image 2D sauvegardée, titrée et légendée. Le même terme concernait donc deux objets différents, l'un à deux et l'autre à trois dimensions. Une amélioration de notre ingénierie didactique devra

prendre en compte cet aspect lexical pour proposer des dénominations claires et mieux différenciées.

VI.2.3. Utilité et utilisabilité d'*EDUANATOMIST* et de *NEUROPEDA*

Nos observations peuvent apporter des informations concernant l'utilité et l'utilisabilité du logiciel *EDUANATOMIST* telles qu'elles ont été définie par Tricot et al. (Tricot et al., 2003).

L'utilité est considérée par ces auteurs comme la « possibilité d'atteindre le but fixé à l'aide du logiciel », et son évaluation empirique vise à déterminer l'adéquation entre l'objectif défini et l'apprentissage effectif. Dans le cadre d'une séance consistant dans la construction d'une carte d'activation fonctionnelle somesthésique par des élèves de 1^oS, nous avons observé différents indicateurs de l'utilité d'*EDUANATOMIST* et de la banque *NEUROPEDA*. L'existence dans la banque *NEUROPEDA*, d'un jeu de fichiers IRM illustrant la notion de somesthésie, est le premier élément important que l'on puisse citer. Les IRM anatomiques et fonctionnelles disponibles ont effectivement permis de mettre en œuvre la construction de carte fonctionnelle par les élèves. La possibilité de modifier les bornes d'affichage donnée par *EDUANATOMIST* à l'utilisateur, nous a permis de placer les élèves en situation de travailler sur la signification des images en relation avec l'étape de traitement statistique des données dont elles sont issues. Des aspects négatifs, introduisant des difficultés ou des obstacles ont aussi été repérés :

- L'impossibilité d'afficher les informations sur l'image par l'intermédiaire du logiciel était contraire à notre travail sur la sémiologie des IRM. Nous avons dû fournir aux élèves un tableau d'informations lourd et complexe.
- L'affichage suivant les mêmes codes visuels d'informations de nature différentes, a rendu difficile la distinction entre ces informations pour certains élèves. Par exemple, le contraste de l'image anatomique, le taux d'irrigation de l'image brute et le degré de signification de la carte d'activation fonctionnelle sont codés de la même façon par le même type d'échelle colorée. Si une image fonctionnelle est ouverte en premier, elle sera colorée en noir et blanc comme le sont habituellement les images anatomiques.
- L'absence de feed-back du logiciel, en particulier concernant la pertinence des images produites, a conduit à la production par de nombreux élèves de cartes non significantes sans qu'ils puissent le détecter.
- La transposition didactique concernant l'échelle de signification statistique des IRMf, réalisée entre le logiciel de recherche *Anatomist* et le logiciel *EDUANATOMIST* destiné à l'enseignement nous a paru assez obscure. La relation mathématique précise entre les valeurs s'affichant sur l'interface et la statistique de test calculée nous a manqué pour expliciter mieux aux élèves l'étape statistique de construction de la carte. Un binôme (2B) s'est d'ailleurs questionné sur cette relation. Dans le logiciel de recherche *Anatomist*, chaque voxel des IRMf que nous avons utilisées, est caractérisé par la statistique de test, qui correspond au résultat du test statistique de comparaison entre les deux séries de mesures réalisées pour ce voxel dans les deux conditions à comparer. Cette valeur peut être comparée aux valeurs d'une table, pour déterminer si la différence est significative, pour un risque choisi de se tromper. Lorsque la statistique de Test augmente, le risque pris à affirmer que la différence est significative diminue. On peut donc affirmer que la signification de la différence augmente. Dans le logiciel *EDUANATOMIST*, les valeurs de la statistique de Test sont converties en gradation relative, comprise entre 0 et 100, vraisemblablement en donnant la valeur 0 aux statistiques les plus faibles, la valeur 100 aux statistiques les plus élevées et en répartissant les valeurs intermédiaires de façon linéaire entre ces bornes. On peut donc penser que plus un voxel a une valeur élevée, plus la différence d'irrigation entre les deux conditions est significative. Cependant, on ne peut plus savoir quel risque est associé à

l'affirmation que la différence d'irrigation entre les deux conditions est significative, ce qui correspond à une perte importante d'information sur l'image. En effet, on peut imaginer une IRMf dont aucun voxel ne présenterait de différence significative entre les deux séries de mesures effectuées, avec, par exemple, un risque de 90% de se tromper. Les valeurs des statistiques de Test attribuées à tous ses voxels seraient donc inférieures au seuil nécessaire pour affirmer une différence. Pourtant, les valeurs les plus élevées apparaîtraient dans *EDUANATOMIST* avec les couleurs correspondant aux valeurs relatives proches de 100, qui sont interprétées comme les plus significatives. Cette transposition de valeurs absolues qui peuvent être comparées à des tables de références, en valeurs relatives qui ne peuvent plus être comparées qu'entre elles, introduit d'importants risques d'erreur dans l'interprétation des images et nous paraît être en opposition avec l'objectif d'éducation à l'image scientifique du logiciel.

L'*utilisabilité* d'un dispositif correspond à la possibilité de mettre en œuvre les moyens qu'il offre pour atteindre un but (Tricot et al., 2003). Notre expérimentation visant la conception d'une IRMf peut donc être utilisée pour l'évaluation empirique de celle d'*EDUANATOMIST*. Le logiciel a été utilisable par nos élèves. Après une séance de découverte accompagnée d'une fiche technique, les fonctionnalités d'ouverture et de superposition des images, les outils de visualisation en 3D, et de modification de coordonnées spatiales et des bornes d'affichage leur ont effectivement permis de manipuler les images pour construire des cartes d'activation fonctionnelle. La sauvegarde des images produites au format « jpeg » a été facilement réalisée par les élèves qui les ont utilisées pour produire des diapositives titrées et légendées.

Certaines caractéristiques ont cependant introduit des pertes de temps ou des difficultés :

- L'utilisation des outils spatiaux de déplacement dans le volume cérébral a posé des problèmes à plusieurs élèves, qui n'ont pas exploré la profondeur des plans de coupes. L'outil très efficace de positionnement (croix rouge) qui permet de visualiser les 3 coupes passant par le même point semble avoir été ignoré par les élèves.
- L'absence de mémorisation par le logiciel des chemins d'accès pour ouvrir des fichiers images, et de bouton permettant d'annuler l'action précédente a été regrettée par les élèves, ainsi que le retour aux coordonnées spatiales par défaut non seulement lors du chargement d'une image, mais aussi lors du Masquage/Démasquage d'une image.
- L'existence de palettes incluant les mêmes couleurs (comme la palette bleu-rouge et la palette blanc-bleu) a causé une certaine confusion dans l'interprétation des images.
- La redistribution de l'ensemble de la palette colorée entre les bornes d'affichage inférieure et supérieure pour les IRMf ne semble pas avoir été comprise directement par les élèves.

VI.2.4. Propositions d'amélioration du logiciel *EDUANATOMIST*

Dans la perspective de la poursuite du développement d'*EDUANATOMIST* et de la banque *NEUROPEDA*, nous proposons plusieurs pistes d'amélioration :

- L'ergonomie de l'ouverture et du masquage des images devrait être revue, pour faciliter l'utilisation de la banque d'image et rendre le travail moins fastidieux : le logiciel pourrait garder en mémoire le dernier dossier ayant servi pour l'ouverture d'une image et le proposer par défaut lors d'une nouvelle ouverture. Il serait aussi intéressant de pouvoir masquer et démasquer des images sans modifier les réglages des coordonnées spatiales. Enfin des possibilités de revenir sur la dernière action, et de rétablir une image telle qu'à son ouverture, (sans avoir besoin de la fermer et de l'ouvrir à nouveau ou de la masquer/démasquer) pourraient être offertes.

- Une incitation à l'utilisation des possibilités de visualisation du cerveau dans l'espace pourrait peut-être être obtenue par l'implémentation de « bulles d'aide » concernant les outils d'exploration spatiale ou par une invitation à les utiliser en début de session.
- La transposition didactique appliquée à l'échelle de signification de la différence d'irrigation pour les images IRMf nous paraît devoir être ré-étudiée, pour préciser exactement quelle relation elle introduit entre la valeur qu'elle confère à chaque voxel, et la statistique de test correspondante. Le choix d'offrir des valeurs relatives, comparables entre elles sur une même image mais pas d'une image à l'autre, nous paraît avoir plus de conséquences négatives sur la compréhension du statut des IRMf et leur interprétation, que de vertus simplificatrices. Il faudrait mener une réflexion sur la façon d'explicitier le sens de l'échelle proposée et sur la possibilité de faire figurer plutôt les valeurs des statistiques de test.
- La redistribution de l'ensemble des couleurs de la palette sur les voxels de valeurs comprises entre les bornes d'affichage inférieure et supérieure, nous paraît difficile à comprendre pour l'utilisateur dans l'état actuel de l'interface. On pourrait se demander si l'échelle ne devrait pas rester constante, les voxels dont les valeurs étant à l'extérieur des bornes étant simplement masqués. Dans le cas où la redistribution des couleurs serait maintenue, la position à l'écran des valeurs sélectionnées pour les bornes d'affichages pourrait être modifiée pour faciliter la compréhension de leur signification.
- Le nombre de palettes (2 sur la version actuelle du logiciel) n'utilisant qu'une seule couleur associée à du blanc par exemple, pourrait être augmenté pour permettre une utilisation concomitante de différentes couleurs lors de la superposition de différentes IRMf, sans prêter à confusion. Dans ce cas, il semblerait judicieux d'orienter toujours la gradation de couleur dans le même sens (augmentation de la signification du signal avec l'intensité des couleurs : du clair au sombre par exemple).
- Dans l'optique d'une éducation à l'image scientifique, l'implémentation d'un dispositif de consultation des informations sur les images, lorsqu'elles sont ouvertes dans le logiciel, permettrait aux utilisateurs de mieux travailler les relations entre le référent et le signifiant des images. Sans doute l'affichage permanent de toutes les informations serait-il trop lourd, mais la possibilité de les consulter sans sortir du logiciel serait une amélioration importante.
- Une réflexion pourrait aussi être menée sur la catégorisation des images affichées, (image anatomique, image 3D, image brute d'acquisition fonctionnelle, carte d'activation fonctionnelle), qui pourraient être différenciées par des interfaces de traitement différentes, explicitant clairement le type d'image affiché. Ce type de modification n'est pas facilement réalisable, car elle supposerait une complexification de l'interface et une indexation supplémentaire des images de la banque de données.
- Une réflexion pour la conception de rétroactions concernant la pertinence des images pourrait aussi être envisagée, par exemple lorsque les coordonnées spatiales n'ont pas été modifiées, ou lorsque la borne supérieure est réglée sur une valeur inférieure à 100.
- On pourrait aussi envisager le développement d'une version du logiciel affichant directement les images en tenant compte des bornes d'affichage pertinentes, et ne laissant pas la possibilité de les modifier.

- Enfin, du point de vue du chercheur, l'ajout de fonctionnalités de traçage de l'activité de l'utilisateur serait aussi très appréciable.

VI.2.5. Évaluation de la pertinence scientifique des images produites

Comme nous l'avons déjà évoqué plus haut, la situation didactique expérimentée ne comprenait pas de dispositif d'évaluation de la pertinence des images construites par les élèves. Le fait que des novices ne distinguent pas facilement sur des images les éléments signifiants que les experts repèrent facilement est bien connu. L'acquisition de cette expertise est nommée « *noticing effect* » par Lindgren et Schwartz (Lindgren et Schwartz, 2009). Elle est encore plus difficile pour les IRM fonctionnelles, puisqu'une part des informations nécessaires à l'évaluation de la pertinence de l'image correspond à des paramètres de construction, qui restent implicites s'ils ne sont pas indiqués en légende. C'est le cas de nombreuses images scientifiques numériques produites aujourd'hui, dont certaines sont falsifiées même dans des publications scientifiques (Young, 2008), ce qui prouve bien la difficulté d'évaluer leur pertinence.

Outre des rétroactions intégrées au logiciel, portant sur les choix de bornes d'affichage et de coordonnées spatiales évoquées plus haut, on peut bien sûr imaginer une intervention de l'enseignant pour une étape de validation de la pertinence des images produites. Le moment et les modalités choisis pour cette intervention didactique devraient être étudiés scrupuleusement pour éviter les effets de contrat (Brousseau, 1998). Une autre piste est offerte par Watson et Lom (Watson et Lom, 2008) qui ont réalisé une ingénierie didactique pour apprendre à des étudiants à communiquer avec des images scientifiques. Elles ont construit une séquence d'apprentissage basée sur la réalisation d'images microscopiques illustrant des expériences de biologie du développement, et sur la présentation de ces images sous forme de portfolio et de poster dans un but de communication entre étudiants. Lorsque les étudiants avaient construit leur poster, ils avaient la possibilité de consulter un ensemble de posters réalisés par les étudiants des années précédentes, ainsi que les remarques correspondant à leur évaluation par les enseignants. D'après les auteurs, cette étape a permis aux étudiants de comparer leurs résultats à ceux des autres et d'en évaluer la pertinence. Elle s'est aussi traduite par une amélioration de la présentation des images et de l'organisation des posters. Ce dispositif rappelle aussi le mode de travail des chercheurs, qui mettent leurs résultats en regard de ceux déjà publiés par leurs collègues. Cet exemple concerne des étudiants plus âgés que nos élèves, et sans doute plus experts en biologie, mais on peut imaginer que quelques éléments issus des publications scientifiques correspondant aux fichiers images exploités dans la séance soient tenus à disposition des élèves pour leur donner les moyens d'évaluer la pertinence de leurs constructions. La forme prise par ces informations doit être étudiée pour qu'elles puissent être facilement mises en relation avec les résultats des élèves, tout en évitant qu'elles soient simplement recopiées. Il serait intéressant qu'elles concernent différents individus, pour permettre aux élèves de constater à la fois la variabilité interindividuelle et les propriétés communes du fonctionnement cérébral pour la somesthésie. En effet, la présentation de plusieurs cas contrastants semble faciliter la discrimination entre les éléments importants et les accessoires par les novices (Lindgren et Schwartz, 2009).

VI.2.6. Communication et sémiologie de la carte d'activation fonctionnelle

Notre expérimentation a montré que l'étape de communication par écrit utilisant la carte construite dans un but de collaboration entre deux groupes pour obtenir une carte plus riche a permis à plusieurs binômes de s'interroger sur leurs stratégies de construction de la carte et sur les informations à joindre à l'image pour en faire une carte signifiante.

La comparaison de leur carte avec celle du binôme partenaire, semble avoir favorisé la compréhension du statut d'image construite pour la carte. En effet, même pour l'étude de la même zone de stimulation, les images produites sont différentes car les choix ont été différents. La carte produite est donc bien une modélisation du réel, et pas une image fidèle de celui-ci. Sa signification dépend des choix réalisés. Devoir collaborer pour faire ensemble de nouveaux choix a donné l'occasion aux élèves de poser des questions, de formuler des arguments, de comprendre mieux certaines étapes de la construction. Pour certains groupes, les échanges ont été très riches. Ils ont permis d'expérimenter dans la communication avec l'autre les relations entre le référent, le signifiant et le signifié de l'image scientifique, pour soi et pour autrui.

Cependant seules quelques étapes de la construction de l'image, ou quelques questions sur sa légende ont été abordées par chaque groupe. Il semble que plus le temps de clavardage a été long, plus l'échange a été riche, mais les divers aspects n'ont jamais été tous explorés par les élèves. Un temps suffisamment important doit donc être consacré à cette activité.

Une phase de mise en commun pour l'ensemble de la classe, par la projection des diapositives de tous les groupes par le professeur par exemple, pourrait aussi permettre aux élèves d'appréhender de nouvelles questions, surtout si la discussion porte explicitement sur la pertinence des informations associées aux images. Ce procédé a été utilisé par Watson et Lom (Watson et Lom, 2008) pour faire apparaître les critères d'évaluation d'une microphotographie. Les auteurs ont constaté qu'il permettait une amélioration des images produites par les étudiants. Pour que les apprentissages qui ont pu se faire durant cette mise en commun puissent être réinvestis, il faudrait qu'elle se déroule avant une dernière phase de production de carte, par exemple, pour un destinataire qui n'aurait pas fait le même travail. La publication des travaux des élèves sur le site de l'établissement, comme nous l'avions prévu au départ, serait un objectif motivant. Ces propositions impliquent un travail sur plusieurs séances, qui n'est peut-être pas très compatible avec l'enseignement du programme de première S. Cependant, construire une éducation à l'image scientifique dans une approche socio-constructiviste ne semble pas pouvoir se faire sans investir du temps. Cet apprentissage pourrait être envisagé comme un objectif à long terme, sur l'ensemble de la scolarité secondaire par exemple.

VI.3. Images scientifiques, communication et apprentissage

VI.3.1. L'éducation à l'IRMf : enjeux sociaux, éthiques et épistémologiques

Les neurosciences et l'imagerie cérébrale sont des sujets de questionnement éthique pour nos sociétés. Dès 2002, des spécialistes de la recherche sur le cerveau commencèrent à s'interroger dans des publications scientifiques sur l'impact éthique, sociétal et politique du progrès des neurosciences et un premier congrès se tenait sur ce sujet aux Etats Unis (Marcus, 2002). Depuis, les espoirs et les inquiétudes se multiplient, suscitant de nombreuses questions qui méritent d'être débattues. L'Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques (OPECST) s'est d'ailleurs saisi du sujet et cette question a été largement évoquée dans une audition publique en 2006¹⁶ et est reprise dans son rapport 2008¹⁷ sur l'évaluation de l'application de la loi de bioéthique de 2004, en préalable à la révision de cette loi qui devrait avoir lieu en 2010. Les relations entre l'imagerie cérébrale et la prédiction des comportements humains (détecteurs de mensonges, neuromarketing...) y sont questionnées : « que lit-on, que dépiste-t-on, que soigne-t-on ? ». Les applications pratiques et les implications éthiques sont envisagées sous l'angle des

¹⁶ Audition publique "les nanotechnologies : risques potentiels, enjeux éthiques", 7 novembre 2006, rapport 3658 Assemblée Nationale.

¹⁷ Rapport sur l'évaluation de l'application de la loi n° 2004-800 du 6 août 2004 relative à la bioéthique, 17 décembre 2008, OPECST, <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/094000025/index.shtml>

possibilités d'entrave à la liberté individuelle au niveau de la conscience et du libre arbitre, et pour l'impact potentiel des neurosciences et de la neuro-imagerie sur la justice (détecteurs de mensonge, responsabilité individuelle...). L'introduction des IRM dans l'enseignement des neurosciences paraît donc nécessaire, car ces images sont déjà présentes dans la sphère médiatique et parfois privée, et l'école se doit d'outiller la réflexion des élèves pour en comprendre les enjeux. Mais cela s'insère dans la question plus large de l'éducation à l'image, abordée par plusieurs disciplines au collège et au lycée.

Les IRM que nous avons utilisées, comme toute IRMf, sont des représentations simplifiées de l'activité cérébrale tant par la focalisation des paradigmes expérimentaux qui les sous-tendent, que par l'interprétation localisationniste qu'elles suggèrent (Molinatti, 2007). Pour éviter les écueils réductionniste et localisationniste, il nous paraît donc important de travailler avec des IRM d'individus différents, mais aussi avec des images montrant la neuroplasticité et illustrant le caractère dynamique des fonctionnements cérébraux. Les images de ce type sont d'ailleurs disponibles dans la banque *NEUROPEDA*, qui a été construite dans cette optique. Pour l'enseignement du chapitre de neurosciences du programme de première S, la présentation de résultats expérimentaux obtenus par d'autres techniques d'étude du cerveau paraît aussi nécessaire. On peut émettre l'hypothèse qu'en explicitant différents modes de construction des représentations de l'activité cérébrale, tels que les graphes que sont les électroencéphalogrammes, ou les cartes corticales de potentiels évoqués dont l'aspect diffère des IRMf, on pourrait peut-être plus facilement mettre en évidence leur statut de modélisations diverses d'une réalité très complexe. Des expérimentations pourraient être menées dans ce sens. Cette approche épistémologique de l'enseignement des IRMf pourrait permettre de mieux définir le domaine de validité des savoirs construits grâce à elles, et de faire connaître aussi aux élèves les questionnements de la science, comme le propose Maryline Coquidé justement à propos des neurosciences car « les ignorances connues constituent des moteurs pour la recherche scientifique » (Coquidé, 2007).

VI.3.2. Images scientifiques : média et ressources pour l'enseignement

Notre travail sur la construction par les élèves de cartes cérébrales d'activation fonctionnelle par IRMf peut présenter un intérêt pour l'éducation à d'autres images scientifiques. Les images satellitaires obtenues par télédétection par exemple présentent certaines caractéristiques semblables aux IRMf : elles sont construites à partir de données numériques issues de mesures physiques et soumises à des traitements mathématiques complexes, utilisent des codes colorés dont les significations varient d'une image à l'autre, sont visualisables de façon numérique, bref, elles sont le résultat d'une modélisation de leur référent.

Les connexions avec la didactique de la géographie et de la géologie, en particulier pour la notion de carte et les relations dans la légende sur l'explicitation du signifiant de l'image sont aussi à explorer.

Le travail de construction d'une carte, à partir de données récoltées sur le terrain, ou de traitement d'image capturées par les élèves eux-mêmes, par exemple en microscopie optique, sont des pistes à explorer pour la construction au cours de la scolarité d'une représentation de la carte et de l'image scientifique comme une modélisation. D'après Bruno Latour (Latour, 2006), la carte est un *mobile immuable*, et le fait de la construire est une activité fondatrice de la pensée scientifique : « *chaque inscription offre une plus-value au chercheur : la carte rend cent fois plus d'informations que celles qu'on y avait mises* ». C'est comme si le regard scientifique naissait de l'accumulation de données différentes présentées dans un seul champ visuel : « *le regard du géologue devient scientifique rien qu'à les regarder* ». Si, comme le dit B. Latour « *Ce n'est pas à l'œil nu que l'on voit le monde mais à l'œil habillé* », il nous paraît très important de former l'œil de nos élèves en les mettant en situation de construire des mobiles immuables d'où ils retireront plus d'informations qu'ils y

avaient placées. L'éducation à l'image scientifique apparaît alors autant comme un moyen que comme un but de l'enseignement des sciences.

Si l'on considère les images scientifiques comme des ressources pour l'enseignement des sciences, de nombreuses questions se posent alors à leur sujet : quelles métadonnées faut-il associer aux images dans les banques, pour les rendre utilisables par les enseignants et les élèves ? Comment réaliser leur indexation pour permettre leur recherche et leur diffusion ? Pour les IRM par exemple, comment fournir les données épistémologiques nécessaires à leur interprétation ? Quel intérêt présentent les données didactiques et des résultats d'expérimentations comme la notre pour les professeurs ? L'investigation semble ne pas devoir se limiter aux seules images, mais devoir considérer comme ressource l'ensemble formé par les images, le logiciel de traitement et de visualisation correspondant, et les informations sur l'obtention des images, leurs possibles utilisations, les obstacles qu'elles peuvent susciter... Comment rendre alors ces ressources utilisables par les enseignants ?

Pour explorer ces questions, une étude utilisant l'approche instrumentale de la pratique documentaire des enseignants (Gueudet et Trouche, 2009) pourrait être menée autour des ressources sur les IRMf impliquant *EDUANATOMIST* et *NEUROPEDA*, qui sont mises à disposition des professeurs de SVT sur le site d'ACCES et lors de formations.

VII - CONCLUSION

Notre travail avait pour objectif l'analyse d'une situation d'apprentissage de l'IRMf en tant que modélisation de l'activité cérébrale. Il a montré que dans les conditions étudiées, la réalisation de certaines étapes de la construction d'une carte cérébrale d'activation fonctionnelle est possible en première S, grâce à l'utilisation du logiciel *EDUANATOMIST* et de la banque d'images *NEUROPEDA*. La sélection des étapes qui doivent être laissées à la charge des élèves paraît importante pour permettre l'apprentissage. Ainsi, le réglage des bornes d'affichage en fonction de la signification statistique de l'activation cérébrale et l'exploration spatiale de l'ensemble du volume cérébrale sont apparus présenter des obstacles importants pour la construction du statut de modélisation de l'IRM, et nous paraissent donc devoir être confiés aux élèves de 1^oS. Nous avons initié une réflexion sur les *éléments* à introduire dans le *milieu* pour permettre aux élèves d'évaluer leurs stratégies lors de la réalisation de ces tâches, qu'il serait intéressant de poursuivre.

Notre expérimentation a révélé l'intérêt méthodologique de faire communiquer les élèves par l'intermédiaire du clavardage. Ce dispositif est bien maîtrisé par la plupart des élèves et permet, d'obtenir directement des échanges écrits dynamiques plus facile à analyser que des enregistrements audio. Notre travail a aussi permis de montrer les potentialités de l'aspect communicationnel et collaboratif des situations de travail proposées aux élèves autant pour la formulation de leur stratégies de construction des images, que pour leurs interrogations sur les relations entre le référent, le signifiant et le signifié des IRMf. Les données obtenues ont aussi été utilisées pour enclencher un nouveau cycle dans le développement du logiciel *EDUANATOMIST*, mettant en relation usages dans la classe et conception. Il serait intéressant de pousser plus loin l'analyse, en croisant d'autres sources, encore non étudiées, avec les résultats présentés ici, et en amorçant une nouvelle boucle conception/analyse pour l'amélioration des séances proposées, et des ressources mise à dispositions des enseignants. La conception de ressources pluridisciplinaires, ou de ressources d'une discipline à usage de professeurs d'une autre discipline par exemple, est une perspective ouverte par notre travail sur les IRMf, dont la construction fait intervenir plusieurs disciplines.

Des liens sont aussi à faire avec l'éducation à d'autres images scientifiques, telles que les images issues de la télédétection, qui sont d'autres exemples de la construction d'images par modélisation, pour mieux définir les apports du travail sur les images à l'enseignement des sciences. La dimension esthétique des images scientifiques, pouvant susciter à la fois motivation et obstacles, devrait aussi être explorée.

VIII - BIBLIOGRAPHIE

ARTIGUES, M. (1988). Ingénierie didactique. *Recherche en didactique des mathématiques*, Vol 9, n°3, 281-308.

BABOU, I. (1999). *Science, télévision et rationalité. Analyse du discours télévisuel à propos du cerveau*. Thèse. Université Paris 7- Denis Diderot.

BANDETTINI, P.A. & UNGERLEIDER, L. G., 2001. "From neuron to BOLD : new connections", *Nature neuroscience*, volume 4 n° 9, pp 854-866.

BARDEL, C. & CLEMENT, P. (1998). Comment et par qui est obtenue une IRM ? dans Formation à la médiation et à l'enseignement : enjeux, pratiques, acteurs. In GIORDAN, A. , MARTINAND, J.L. & RAICHVARG, D. (Ed). *Actes des XX° journées sur la communication, l'éducation et la culture scientifiques et industrielles*.

BERTIN, J. (1967).*Sémiologie graphique*. Paris : Ed Mouton.

BROUSSEAU, G. (1982a). *Les objets de la didactique des mathématiques*. Actes de la troisième école d'été de la didactique des mathématiques. Olivet.

BROUSSEAU, G. (1982b). *Ingénierie didactique : d'un problème à l'étude a priori d'une situation didactique*. Actes de la deuxième école d'été de la didactique des mathématiques. Olivet.

BROUSSEAU, G. (1998). *Théorie des situations didactiques*. Grenoble : La pensée sauvage.

BUNGE, M. (1975). *Philosophie de la physique*. Paris : Éditions du Seuil.

CLEMENT, P, COTTANCIN, D. & FEBVRE, V. (1998). Quelles conceptions sur les fondements biologiques de l'identité d'un être humain ?. In GIORDAN, A, MARTINAND, J.L. & RAICHVARG, D. (Ed). *Actes Journées internationales sur l'éducation et la culture scientifiques techniques et industrielle* (pp 181-188). Chamonix : Université Paris Sud.

CLEMENT, P. (1994). La difficile évolution des conceptions sur les rapports entre cerveau, idées et âme. In GIORDAN, A., GIRAULT, Y. & CLEMENT, P. (Ed). *Représentation, conceptions, connaissances* (pp73-90). Berne : Peter Lang.

CLEMENT, P. (1996). *L'imagerie Biomédicale : définition d'une typologie et proposition d'activités pédagogiques*. ASTER 22, Images et activités scientifiques, 87-126.

CLEMENT, P. (1997). Cerveaux d'hommes et de femmes : l'idéologie était déjà dans la revue Nature. In GIORDAN, A, MARTINAND, J.L. & RAICHVARG, D. (Ed). *Actes Journées internationales sur l'éducation scientifique* (pp 267-272). Chamonix : Université Paris Sud.

CLEMENT, P. (2001). Using complex images in the popularization of science : Scientific or ideological agenda ?. In ROUET, J.F., LEVONEN, J. & BIARDEAU, A. (Ed). *Multimedia learning : cognitive and instructional issues* (pp.182-183). London : Pergamon (Elsevier Science), p.87-98.

COQUIDE, M. & TIRARD, S. (2007). *Neuroplasticité, enseigner de nouveaux savoirs ou un nouveau regard ?* (pp27-56). Paris : Vuibert.apapt-snes.

COQUIDE, M. (2007). Des ignorances... sources de connaissance. In COQUIDE, M. et TIRARD, S. (Ed), *Neuroplasticité, enseigner de nouveaux savoirs ou un nouveau regard ?* (pp13-24). Paris : Vuibert.apapt-snes.

DOYON, D., CABANIS, E.A. & IBA-ZIZEN, M.T.(1997). *Imagerie par résonance magnétique*. Masson.

ECO, U. (1968). *La struttura assente*, traduction française de ESPOSITO-TORRIGIANI. U. *La structure absente. Introduction à la recherche sémiotique*. Ed Mercure de France, Paris 1972 .

ECO, U. (1997). *Kant e l'ornitorinco*. Milan : Eds Bompiani. Traduction française de GAYRARD, J. *Kant et l'ornithorynque*. Eds Grasset & Fasquelle, 1999.

GUEUDET, G. & TROUCHE L. (2009). Ressources numériques et documentation des professeurs. Un nouveau regard sur conception et usage, in DELOZANNE, E. , TRICOT, A. & LEROUX, P. (Ed.). *EIAH'2009* (215-222). Le Mans.

HALLOUN, I. A. (2004). *Modeling theory in science education*. Dordrecht, Holland : Kluwer Academic Publishers.

HERVE, J.C. (2007). De l'arc réflexe à la plasticité cérébrale, 1968-2001, 30 ans d'enseignement des neurosciences au Lycée. In COQUIDE, M. & TIRARD, S. (Ed), *Neuroplasticité, enseigner de nouveaux savoirs ou un nouveau regard ?* (pp27-56). Paris : Vuibert.apapt-snes.

JACOBI, D. (1987). *Textes et images de la vulgarisation scientifique*. Berne. Francfort-s Main . Paris : Peter Lang.

LATOURE, B. (1985). Les vues de l'esprit. Une introduction à l'anthropologie des sciences et des techniques. *Culture Technique, Les vues de l'esprit n°14*, juin 1985, pp 4-30.

LINDGREN, R. & SCHWARTZ, D.(2009). Spatial learning and computer simulations in sciences . *International Journal of Education, Vol 31, N° 3*, pp 419-438.

MAFFEO, V. (1998). Cent ans d'images du cerveau dans les manuels français du secondaire. In GIORDAN, A., MARTINAND, J.L. & RAICHVARG D. (Ed) *Actes des XXes journées internationales sur la communication, l'éducation, et la culture scientifiques et industrielles* (pp 411-416). Université Paris 7 - GHDSO.

MAFFEO, V. (1999). *Statut et rôle des images médicales du cerveau dans l'enseignement secondaire français. Approches didactique, épistémologique et socio-historique*. Thèse, Université Claude Bernard, Lyon I.

MAFFEO, V.(2007). Plasticité cérébrale et enseignement, de l'utilisation des images médicales. In COQUIDE, M. & TIRARD, S. (Ed), *Neuroplasticité, enseigner de nouveaux savoirs ou un nouveau regard ?* (pp105-128). Paris : Vuibert.apapt-snes, juin 2007.

MARCUS, S.(2002). *Neuroethics : Mapping the Field*. Suisse : Dana Press.

MARTINAND, J-L (1992). Présentation. In MARTINAND, J.L. (Ed), *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences* (pp 7-22). Paris, INRP.

MAZOYER, B.(2001). *L'imagerie cérébrale fonctionnelle*. Paris : PUF.

McCABE, D. P. & CASTEL, A. D. (2007) Seeing is believing : the effect of brain images on judgments of scientific reasoning. *Cognition* (2007), doi :10.1016/j.cognition.2007.07.017.

MOLINATTI, G. (2007). *Médiation des sciences du cerveau. Approche didactique et communicationnelle de rencontres entre neuroscientifiques et lycéens*. Thèse. Muséum d'Histoire Naturelle. Paris.

MOLINATTI, G., VILAIN, Y. & JAUZEIN, F. (2007) Imagerie par résonance magnétique. *site ACCES* :

http://acces.inrp.fr/acces/ressources/neurosciences/methodes_etude_cerveau/imagerie_resonn_mag_netiq

et

http://acces.inrp.fr/acces/ressources/neurosciences/methodes_etude_cerveau/irm_atomique_et_fonctionnelle/index.html

PIAGET, J. (1964). *Six études de psychologie*. Paris : Coll. Méditations. Denoël Gonthier.

PIERCE, C. S. (1978). *Ecrits sur le signe*. Paris :Seuil.

RANC, M., FAVERJON, A., MOLINATTI, G. & JAUZEIN, F (2007). 3D – S’orienter dans le cerveau : une expérimentation en 1°. *Les Dossiers de l'Ingénierie Educative*, N° , 85-89.

Réaction, logiciel INRP créé par F. Tilquin, 2007 ,
http://acces.inrp.fr/acces/vie/cerveau/sommeil/DossierScientifSommeil/index_html

SANCHEZ, E. (2008a). *Démarche d'investigation, modélisation et enseignement des sciences*.
<http://www.lemensuel.net/2008/03/01/demarche-d%E2%80%99investigation-modelisation-et-enseignement-des-sciences/>

SANCHEZ, E. (2008b). Quelles relations entre modélisation et investigation scientifique en science de la Terre ? *Education & Didactique*, Vol 2 , n°2, 93-118.

SANCHEZ, E. (2008c). Modélisation et simulation dans l’enseignement des sciences de la vie et de la Terre. *Les dossiers de l'Ingénierie Educative* ,78-81.

SANCHEZ, E. & PRIEUR, M. (2007). Model and Modelling during Geoscience Teachers Practices in France. Conférence ESERA, Malmö, Sweden, p180.

STATISTIX. <http://www.statistix.fr/> site de ressources, de partage et de mutualisation pour l'enseignement de la statistique (responsable de publication, Claudine Schwartz)

TRICOT, A., PLEGAT-SOUTJIS, F., CAMPS, J-F., LUTTZ, A.A.G. & MORCILLO, A. (2003) Utilité, utilisabilité, acceptabilité : interpréter les relations entre trois dimensions de l’évaluation des EIAH. Actes de la Conférence EIAH, Strasbourg, 391-40.

VIDAL, C. & BENOIT-BROWAEYS, D. (2005). *Cerveau, Sexe et Pouvoir*. Paris : Belin.

VION-DURY, J. (2002). *Cours de résonance magnétique, spectroscopie et imagerie*. Ellipses

VYGOTSKI, L. (1934). *Pensée et langage* (1998 ed.). Paris : La Dispute.

WATSON, F. L. & LOM, B. (2008). More than a picture : Helping undergraduates learn to communicate through scientific images. *CBE-Life Sciences Education*, Vol 7, 27-35.

YOUNG, J.R. (2008). Journals find many images in research are faked. *Chronicle of Higher Education*, Vol54, N°39, pA1.

IX - ANNEXES

Numéro de l'annexe	Titre (ou contenu)	page
1	Activité préliminaire : utilisation d'un test statistique de Student pour comparer deux séries de mesures	
	- A : synopsis de la séance	1
	- B : gestion de la discussion par le professeur	2
	- C : fichier <i>EXCEL</i> utilisé	4
2	Activité préliminaire : repérage anatomique avec le logiciel <i>EDUANATOMIST</i>	
	- A : consignes données aux élèves fiche réponse	8
	- B : fiche réponse	9
	- C : fiche d'information	11
	- D : fiche technique d'utilisation d' <i>EDUANATOMIST</i>	12
3	Activité préliminaire : élaboration d'hypothèse sur le fonctionnement du cerveau, document et consignes	14
4	Séance de construction d'une carte d'activation fonctionnelle	
	- A : synopsis de la séance ou de l'intervention du professeur	15
	- B : fiche de consigne	17
	- C : tableau des fichiers IRM disponibles	19
	- fiche technique d'utilisation d' <i>EDUANATOMIST</i> voir 2D	12
5	Productions des élèves : indicateurs relevés sur les copies d'écran	
	- A : groupe A	20
	- B : groupe B	21
6	Productions des élèves durant l'activité préliminaire d'utilisation d'un test statistique de Student.	
	- A : réponses des élèves	22
	- B : analyse des réponses	25
7	Tableau d'analyse des présentations <i>POWERPOINT</i> réalisées par les élèves.	
	- A : informations ajoutées à l'image (groupe A)	31
	- B : titres et légendes (groupe B)	32
	- C : informations ajoutées à l'image (groupe B)	33
	- D : analyse formelle des diapositives (groupe A)	34
	- E : analyse formelle des diapositives (groupe B)	35
8	Réponses écrites aux questions posées durant la séance II.	
	- A : Question 1, groupe A	36
	- B : Question 1, Groupe B	37
	- C : question 2, groupes A et B	38
9	Clavardages MSN des différents groupes	
	- A : binômes 5A-6A	39
	- B : binômes 1B-2B	40
	- C : binômes 3B-5B	41
	- D : binômes 4B-6B	42
	- E : binômes 7B-8B	43