

Université de Technologie de Compiègne

**Analyse des explorations haptiques de formes pour la  
conception d'un dispositif de suppléance perceptive dédié  
aux personnes aveugles**

**ANNEXES**

**Thèse**

Pour obtenir le grade de

**Docteur de l'UTC :**

**Spécialité : Sciences de l'Homme et Technologie de la Cognition et de la  
Coopération**

Présentée et soutenue publiquement par

**Amal ALI AMMAR**

Directeur de thèse  
Olivier GAPENNE

Membres du Jury :  
Denis CHENE  
Daniel MELLIER  
Pierre PASTRE  
Philippe TRIGANO  
Nadine VIGOUROUX

## SOMMAIRE

<b><u>1 ANNEXE 1 : LES RECOMMANDATIONS DU WORLD WIDE WEB CONSORTIUM</u></b>	<b>3</b>
<b><u>2 ANNEXE 2 : CRITERES ERGONOMIQUES POUR UNE ASSISTANCE ADAPTEE</u></b>	<b>7</b>
2.1 CATEGORISATION PREALABLE DE L'ASSISTANCE ET CRITERES DE LA CATEGORISATION DE L'ASSISTANCE	7
2.2 CRITERES POUR LA CONCEPTION DE TECHNOLOGIES ADAPTEES	8
<b><u>3 ANNEXE 3 : LOGICIELS D'APPRENTISSAGE EN GEOMETRIE</u></b>	<b>12</b>
3.1 DE L'ENSEIGNEMENT PROGRAMME AUX MICROMONDES	12
3.2 CABRI ET CABRI GEOMETRE : UN MICROMONDE EN GEOMETRIE	14
3.3 GEOPLAN	14
3.4 TD MATHS ET TD GEOMETRIE	16
<b><u>4 ANNEXE 4 : PSYCHOPHYSIOLOGIE DU SYSTEME HAPTIQUE</u></b>	<b>17</b>
4.1 SENSIBILITE CUTANEE	17
4.2 LA PROPRIOCEPTION	22
4.3 LE TRAITEMENT CORTICAL DE L'INFORMATION SENSORIELLE	23
4.4 PLASTICITE CEREBRALE	25
<b><u>5 ANNEXE 5 : LOGICIEL DE LECTURE DE TRACES ET GRILLE D'ANALYSE DE L'ACTIVITE EXPLORATOIRE</u></b>	<b>28</b>
5.1 TACTPLAYER	28
5.2 GRILLE D'ANALYSE DES EXPLORATIONS SUR PAPIER THERMOGONFLE	29
<b><u>6 ANNEXE 6 : EXEMPLES DE FIGURES (TAILLE REELLE) UTILISEES DANS DIFFERENTES SITUATION D'ETUDE</u></b>	<b>30</b>
6.1 PERCEPTION DU NOMBRE, DE L'ORIENTATION ET DE LA POSITION DES SECANTES	30
6.2 PERCEPTION DE L'ORIENTATION D'UNE SECANTE ET LOCALISATION D'UNE INTERSECTION	30
6.3 LOCALISATION ET LECTURE D'UNE FORME SIMPLE DANS UN REPERE	31
6.4 EVALUATION DU MARQUAGE SONORE LORS DE LA LECTURE DE FORME DANS UN REPERE	32
6.5 EVALUATION DU MARQUAGE SONORE LORS DE LA LECTURE DE POLYGONES	34
6.6 LOCALISATION D'UNE DROITE DANS UN REPERE ORTHONORME	36
6.7 ETUDE SUR LA CATEGORISATION	37

---

# 1 Annexe 1 : Les recommandations du World Wide Web Consortium

Ces recommandations se présentent sous la forme de 14 directives<sup>1</sup>.

1.	<b><i>Fournir des alternatives équivalentes au contenu auditif et visuel</i></b>
2.	<b><i>Ne pas s'en remettre exclusivement aux couleurs</i></b> S'assurer que les textes et graphiques sont compréhensibles quand on les visualise sans couleur.
3.	<b><i>Utiliser le balisage et les feuilles de style, et cela de façon appropriée</i></b>
4.	<b><i>Clarifier l'utilisation du langage naturel</i></b> Utiliser un balisage facilitant la prononciation ou l'interprétation du texte abrégé ou en langue étrangère.
5.	<b><i>Créer des tableaux qui se transforment de façon élégante</i></b> S'assurer que les tables possèdent les balises nécessaires pour être interprétées par les logiciels de consultation existants et autres agents utilisateurs.
6.	<b><i>S'assurer que les pages qui contiennent de nouvelles technologies se transforment de façon élégante</i></b>
7.	<b><i>Assurer à l'utilisateur le contrôle des changements du contenu lorsque ce dernier varie dans le temps</i></b>
8.	<b><i>Assurer un accès direct aux interfaces utilisateur intégrées</i></b> S'assurer que l'interface utilisateur respecte les principes d'accessibilité: Accès aux fonctionnalités indépendant du type d'interface utilisateur, accès depuis le clavier, commandes vocales etc. Lorsqu'un objet inclus possède sa "propre interface", l'interface - comme celle du navigateur lui-même - doit être accessible. Si on ne peut rendre accessible l'interface de l'objet intégré, on veillera à proposer une solution alternative.
9.	<b><i>Conception respectant l'indépendance par rapport au périphérique</i></b> Utiliser des fonctions permettant l'activation des éléments d'une page grâce à différentes interfaces.
10.	<b><i>Utilisation de solutions intermédiaire</i></b> Utiliser des solutions d'accessibilité intermédiaires, de manière à ce que les technologies d'assistance et les anciens navigateurs fonctionnent correctement.
11.	<b><i>Utilisation des technologies et directives du W3C</i></b> Utiliser les technologies préconisées par le W3C (selon les spécifications), et respecter les Directives d'accessibilité. Lorsqu'on ne peut utiliser une technologie du W3C ou si en le faisant, on ne peut obtenir un résultat qui se transforme de façon élégante, il faut prévoir une version alternative pour présenter le contenu.
12.	<b><i>Fourniture d'informations de contexte et d'orientation</i></b> Fournir des informations relatives au contexte et à l'orientation pour que les utilisateurs puissent comprendre les éléments et les mises en pages complexes.
13.	<b><i>Fourniture de mécanismes de navigation clairs</i></b> Soit des informations d'orientation, barres de navigation, carte du site etc. - de manière à ce qu'un utilisateur puisse trouver ce qu'il cherche sur le site.
14.	<b><i>S'assurer que les documents sont clairs et simples</i></b>

**Tableau 1 :** Présentation de la version 1.0 des recommandations du W3C. Les sous-directives relatives aux trois niveaux de priorité ne sont pas mentionnées.

---

<sup>1</sup> [www.w3.org/TR/WAI-WEBCONTENT/](http://www.w3.org/TR/WAI-WEBCONTENT/)

Ces dernières répondent à des scénarios d'utilisation et se déclinent chacune en un ensemble de points à contrôler. A chacun de ces points est associé un niveau de priorité. Sont ainsi distingués trois niveaux de priorité.

- \* Priorité 1: l'indispensable
- \* Priorité 2: le nécessaire
- \* Priorité 3: le souhaitable

Par exemple, la première directive comporte trois points de priorité 1 et un point de priorité 3.

- Ainsi le point suivant relève de la priorité 1: « *Fournir un équivalent textuel à chaque élément non-textuel (par exemple via " alt ", " longdesc ", ou dans le contenu des éléments). Ceci inclut : les images, les représentations graphiques de texte (y compris les symboles), les zones actives de cartes cliquables, les animations (par exemple les GIF animés), les appliquettes et objets programmables, l'art ascii, les cadres, les scripts, les images utilisées comme puces pour les listes, les éléments d'espacement, les boutons graphiques, les sons (joués avec ou sans interaction de l'utilisateur), les fichiers audio séparés, les pistes audio de vidéos, et la vidéo* »<sup>1</sup>.
- Le point de priorité porte sur les liens contenus dans les cartes cliquables : « *Jusqu'à ce que les agents utilisateurs soient en mesure de restituer les équivalents textuels des liens des cartes cliquables côté client, fournir des liens textuels redondants pour chaque région active d'une carte cliquable côté client* »<sup>1</sup>.

Il existe des outils logiciels pour effectuer un audit de l'accessibilité des pages Web en fonction des recommandations du W3C. Appelés également « *inspecteurs* », ils listent les points de priorité non satisfaits, les erreurs de programmation, les risques de non-compatibilité entre logiciels. Certains vont au-delà d'une simple évaluation de l'accessibilité et se proposent de vérifier l'ergonomie du site en terme, par exemple, de temps de téléchargement et de pertinence des catégories employées. Le plus célèbre des inspecteurs est sans doute Bobby<sup>2</sup>. Cet outil aide les auteurs des pages Web à modifier les points de priorité non satisfaits. En outre, il invite le concepteur de page Web à vérifier lui-même les points qui nécessitent des évaluations subjectives. Bobby examine aussi la compatibilité de la page Web avec les différents navigateurs existants. Il peut être téléchargé localement ou à partir du site

---

<sup>2</sup> bobby.watchfire.com

de CAST's. Si la page respecte tous les points de priorité 1 alors le label « Bobby approved » est apposé.

Si Bobby indique au concepteur les lignes de programmation à modifier et les actions à effectuer, néanmoins, ces indications ne sont pas reliées aux directives du W3C. Le concepteur de site doit alors cliquer sur chacune de ces indications pour savoir à quel aspect d'accessibilité cela renvoie. L'évaluation de Bobby procède par point de priorité et non pas par directive. Le concepteur mesure plus aisément le degré d'accessibilité que les problèmes d'accessibilité.

- **Les navigateurs spécialisés**

Un navigateur est un logiciel qui permet de parcourir les pages Web, à titre d'exemple citons : Internet Explorer, Mozilla ou encore Netscape. Les navigateurs spécialisés présentent les informations disponibles sur les pages Web de manière plus accessible aux non-voyants. L'information est traitée à partir du code source des pages HTML. Ces logiciels vont, par exemple, filtrer l'information graphique. Enfin, certains de ces navigateurs sont plus ou moins sophistiqués : ils s'adaptent à l'utilisateur au cours de la navigation, font intervenir des commandes vocales ou des icônes sonores, intègrent des loupes d'écran. Des navigateurs spécialisés dont certains ont été développés par des laboratoires universitaires, s'efforcent de mettre en application des principes d'accessibilité et de faciliter la navigation dans la page web, notamment en donnant des indications sur la structure du document.

Avanti (Stephanidis, Paramythis, Sfyraakis & Savidis, 2001) tente de mettre en application les principes de « *l'accessibilité universelle* » et « *d'interface utilisateur pour tous* ». Ce navigateur s'adapte à l'utilisateur aussi bien au niveau lexical que syntaxique. Cet ajustement s'opère en amont de l'utilisation (l'utilisateur modifie des aspects de l'interface en fonction de ses caractéristiques et de ses préférences) ou au cours de l'utilisation (le système infère la situation de l'utilisateur et réagit par des messages explicites ou par du guidage dans l'accomplissement de la tâche).

Braillesurf<sup>3</sup> a été mis au point par l'équipe Interfaces Non Visuelles et Accessibilité (Inova) de l'INSERM. L'information sous forme de texte peut être lue par une synthèse vocale ou un afficheur Braille. Les malvoyants ont la possibilité de modifier la présentation des textes. Braillesurf propose une application pour évaluer le niveau d'accessibilité d'une page Web.

---

<sup>3</sup> [www.snv.jussieu.fr/inova/bs4/index.htm](http://www.snv.jussieu.fr/inova/bs4/index.htm)

BrookesTalk<sup>4</sup> offre une recherche dite « intelligente » Il permet un parcours rapide des pages Web par une fonction recherche et une communication en langage naturel. Il s'utilise aussi bien avec synthèse vocale qu'avec un logiciel d'agrandissement d'écran. Toutes ses fonctions sont accessibles à partir des commandes clavier. Il offre également la possibilité de configurer la présentation des textes à l'écran. Ainsi non-voyants, malvoyants et voyants peuvent partager ce même outil.

---

<sup>4</sup> [www.brookes.ac.uk/schools/cms/research/speech/btalk.htm](http://www.brookes.ac.uk/schools/cms/research/speech/btalk.htm)

---

## 2 Annexe 2 : Critères ergonomiques pour une assistance adaptée

### 2.1 Catégorisation préalable de l'assistance et critères de la catégorisation de l'assistance

Tout travail de réflexion sur une assistance adaptée rend nécessaire des distinctions conceptuelles afin de prendre en considération la variété des situations d'interaction pour entrevoir les médiations techniques possibles et souhaitables. En préambule de la proposition de critères pour une assistance technologique, Spérandio (2001) définit les notions d'aide, d'assistance et d'outil. Il considère que ces trois termes sont sémantiquement proches.

- \* L'assistance cherche à pallier les limites humaines,
- \* Les outils prolongent l'humain,
- \* Les aides techniques, auxiliaires de l'humain, viennent en renfort dans la poursuite de ses activités, sous des formes variées : manuel d'utilisation, outils autonomes ou encore fonctionnalités intégrées.

Spérandio (ibid.) distingue au moins six critères de catégorisation de l'aide

1. Le niveau d'intervention : Remplacement de l'humain/coopération complémentaire soit encore prothèse/orthèse
2. Sa cible : l'opérateur ou la tâche, s'agit-il de compenser des déficiences, comme dans le cas de l'aide techniques aux handicapés ou d'assister la réalisation des tâches ?
3. Son degré de permanence : est-elle « *autonome, discrétionnaire ou imposée* ? » (ibid., p. 32)
4. Niveau de couverture de l'aide : est-elle totale ou partielle ?
5. Degré d'intelligence artificielle de l'aide
6. Fonctions humaines associées : physiques, cognitives, sensorielles

Si l'aide/assistance et l'assistance/technologies pour handicapés ne sont pas clairement différenciées dans la littérature, la notion d'assistance pouvant s'étendre à tout travail avec instrument, Gapenne, Lenay et Boullier (2001) introduisent de nouvelles distinctions dans leur catégorisation opératoire de l'interaction Humain/Technique. Trois modalités de couplage ont

été initialement retenues : l'assistance, la substitution et le suppléance. Les notions d'aide et d'assistance sont confondues dans ce premier article. Puis, Gapenne, Lenay et Boullier (2002), pour affiner leur catégorisation, ont distingué la notion d'aide de celle d'assistance.

1. La suppléance : ce terme désigne les dispositifs qui modifient le pouvoir d'action de l'utilisateur. L'appropriation du dispositif suppose la constitution de nouveaux invariants. Sous cette catégorie se rangent aussi bien la voiture que les lunettes de vue ou le lecteur d'écran avec synthèse vocale.
2. La substitution est une technologie qui permet à l'utilisateur de déléguer au système l'effectuation d'un schème. Les automatismes relèvent ainsi de cette deuxième modalité de couplage.
3. L'assistance consiste à définir et fiabiliser les transformations produites lors de l'usage des dispositifs de suppléance. Le système, qui a bord d'un véhicule, traite et présente des informations relatives à son fonctionnement est considéré comme une assistance.
4. L'aide s'établit dans la relation entre un aidant qui enseigne des procédures et un aidé qui s'approprie des schèmes d'utilisation.

L'enjeu de cette catégorisation est de proposer des technologies adaptées. Avant d'effectuer un état des lieux des méthodes et des modèles en matières de technologies pour handicapés et plus précisément pour non-voyants, nous présenterons des notions qui incarnent les savoirs fondamentaux de l'intervention ergonomique, soit les critères de base présentés par Spérandio (2001).

## **2.2 Critères pour la conception de technologies adaptées**

Le critère est la fois ce qui permet de distinguer, de porter une appréciation et ce qui sert de base à un jugement. La trame d'analyse et d'action d'un spécialiste de la médiation technique comporte les cinq points suivants :

1. L'utilité
2. L'utilisabilité
3. L'efficacité
4. La non-dangerosité
5. La satisfaction des opérateurs

## **Utilité**

L'utilité est la capacité d'un système à répondre aux besoins des utilisateurs. Cette notion divise la communauté des ergonomes à propos du bien-fondé de l'opinion des utilisateurs. Sont-ils le mieux placés pour savoir ce qui leur est utile ? Néanmoins, des d'indicateurs comme les erreurs, les écarts entre les performances attendues et celles qui sont réalisées, permettent d'objectiver le besoin. Les améliorations et la plupart des projets de conception d'interfaces pour non voyants s'élaborent certes au regard des limites des technologies actuelles mais aussi dans leur prolongement. Les nouveaux besoins à satisfaire sont déduits du constat des difficultés rencontrées.

En revanche, l'anticipation du besoin devient une gageure en cours de conception. Les ergonomes disposent de méthodes prédictives comme les maquettes et la simulation. Cependant, la pleine efficacité de ces méthodes n'est pas garantie et les compétences des ergonomes résident davantage dans le diagnostic des situations existantes que dans l'innovation et la création de dispositifs et d'usages. L'attitude inverse, plus fréquente chez l'ingénieur, consiste à réaliser un coup d'éclat technologique en dépit de tout besoin réel. Norman (1989) déplorait que l'utile et l'utilisable soient souvent sacrifiés sur l'autel de l'innovation. Cependant, le fait de proposer des aides ou assistances en fonction des techniques existantes peut-être « *une voie complémentaire à l'empirisme* » et on ne peut brider l'innovation sous prétexte qu'il n'existe pas de besoin constaté (Spérando, 2001, p. 33).

## **L'utilisabilité**

Ce concept central en IHM est ainsi défini par Spérando (ibid.) « c'est la facilité à utiliser un système, à le mettre en œuvre à s'en servir, à se l'approprier aisément parce que bien adapté aux caractéristiques de l'utilisateur ». De leur côté, les « modèles des tâches » et « les modèles des utilisateurs » ont des visées généralisatrices peu conformes avec la conception de systèmes ciblés. On peut également se référer aux concepts d'opacité et d'affordance pour évaluer l'utilisabilité d'un système.

## **Transparence**

Quand le fonctionnement d'un système est maintenu caché à l'utilisateur, il est dit opaque, c'est à dire hors d'atteinte de sa compréhension...ou transparent, parce que son existence n'est pas censée se manifester. Nécessaire à un certain niveau de complexité, l'opacité devient nuisible si elle s'impose à l'opérateur et que celui-ci n'est plus à même de différencier les

situations qui relèvent de son initiative de celles qui ont été déclenchées automatiquement. La transparence revêt une acception antagoniste dans son autre définition : « *capacité du système à faire connaître ses contraintes de fonctionnement, ses modes de raisonnement, la limite de ses compétences et son état à chaque instant* » (Karsenty, 2001).

### **Affordance**

Elle est communément comprise comme la propriété d'un système à suggérer sa fonction et son usage. Le concept défini par Gibson (1979), repris par Norman (1989) dans le « *Design of Everyday Things* » (DOET) ont eu un retentissement certain en IHM. Néanmoins, ce concept est moins facile à comprendre qu'il n'y paraît si l'on doit en juger par les confusions qu'il a suscitées (Norman, 1999).

### **L'efficacité**

L'efficacité est associée aux deux concepts précédents qu'elle complète. L'utilité dépend des buts poursuivis et du type d'utilisateur/opérateur concerné. L'efficacité dépend des moyens mis en œuvre pour atteindre ces buts et subit par là l'influence de l'utilisabilité. Les gains en efficacité se mesurent par les « *buts atteints* », le « *temps gagné* », « *les erreurs évitées* », « *la charge de travail diminuée* », « *le confort* » (Spérando, 2001, p. 35). Il peut y avoir conflit entre, d'une part, l'efficacité et, d'autre part, la facilité d'apprentissage et d'utilisation. Par exemple, le guidage pas à pas facilite l'apprentissage chez le novice mais risque d'incommoder l'utilisateur expérimenté (Bastien, 2001).

### **La non-dangerosité**

Qu'il menace la santé des opérateurs, qu'il grève l'efficacité des systèmes par des arrêts intempestifs ou des actions importunes, le danger s'envisage dans une acception large. Par exemple, la présence d'un écran de visualisation qui induit une excentration du regard et qui présente des informations secondaires, interfère dangereusement avec la tâche principale de conduite automobile. Les systèmes embarqués et les systèmes experts recèlent d'aides qui viennent contrarier l'action des opérateurs peuvent conduire ces derniers à adopter des décisions dangereuses.

### **La satisfaction des opérateurs**

On pourrait s'attendre à ce que la satisfaction des opérateurs soit corrélée aux critères précédents mais ceci ne se vérifie que partiellement. Ainsi, une innovation aussi efficace soit-elle, peut être accueillie avec d'autant plus de réticences qu'elle modifie des habitudes bien

ancrées. La facilité d'apprentissage peut influencer la satisfaction des utilisateurs (Bastien, 2001)

En ce qui concerne les dispositifs dédiés aux personnes handicapées, ces critères globaux doivent se décliner en fonction des spécificités de la situation : « *En matière d'intervention auprès des personnes handicapées, qu'il s'agisse d'un réaménagement de postes ou d'équipements locaux ou de choisir une technologie adaptée ou de contribuer d'une certaine façon au processus de conception d'un produit nouveau, la démarche nécessite une approche plus clinique qu'en ergonomie « ordinaire » dans la mesure où les différences individuelles entre les personnes handicapées sont nombreuses et pèsent lourd dans les choix à faire. En matière d'outils comme en matière d'aides spécifiques à fournir, tout particulièrement. C'est une remarque préliminaire fondamentale* » (Spérandio, 2001, p. 36-37).

---

## **3 Annexe 3 : Logiciels d'apprentissage en géométrie**

### **3.1 De L'enseignement programmé aux micromondes**

Les premières machines à enseigner ont vu le jour dans les années cinquante. Sous l'influence de la cybernétique et sur la base des théories comportementalistes, naît l'enseignement programmé. Selon Skinner (1954), qui est à l'origine de ce courant pédagogique, l'efficacité d'un apprentissage repose sur les principes suivants : participation active du sujet, séquences courtes, progression graduée selon le rythme de l'élève, vérification immédiate, réponse juste à la question posée. L'ensemble des recherches dans le domaine ont par la suite défini quatre grands principes :

- \* Le principe de structuration de la matière à enseigner
- \* Le principe d'adaptation
- \* Le principe de stimulation
- \* Le principe de contrôle

Sous l'influence des théories piagétienne, les fondements de l'enseignement programmé sont remis en cause. Des philosophies classiques de l'éducation (Dewey, 1976) centrées sur l'analyse des besoins et de l'activité ont également critiqué l'artificialité du découpage des savoirs en séquences de présentation. Si, jusque là, la cybernétique et l'enseignement programmé avait mis l'apprenant sous « le contrôle » de la machine, les nouvelles orientations de recherches vont privilégier son autonomie et son esprit de découverte d'autant plus que les développements technologiques tels que les capacités graphiques vont favoriser d'autres modalités d'interaction.

Feurzeig et Papert (1968), qui reprochent aux mathématiques classiques leur caractère mystérieux et artificiel, décident d'utiliser des langages de type conversationnel et de recourir à la programmation interactive pour permettre à l'apprenant d'exploiter ses intuitions mathématiques et de franchir ainsi le fossé entre la compréhension empirique et les

procédures formelles. Ils s'inspirent des préceptes heuristiques de Polya (1965), par exemple : formuler un plan, diviser les difficultés et ce afin de comprendre les concepts-clé. Le langage par la programmation LOGO (Papert, 1980 ; 1993) veut faire de l'enfant l'artisan de son propre apprentissage. Les activités de nature expérimentale qui lui sont proposées l'aident à deviner une loi générale, à anticiper un résultat, tandis que la verbalisation de ses expériences l'invite à comprendre son propre cheminement cognitif. Afin de mobiliser le corps propre dans l'apprentissage des mathématiques, Papert (1980) introduit la tortue, petit personnage interactif dont les déplacements aide l'apprenant à percevoir l'origine de ses erreurs. L'élève, guidé par ses connaissances sensori-motrices, établit un lien entre sa compréhension intuitive et les formalismes mathématiques. Selon les propres termes de Papert (ibid.), « *nous offrons un milieu où la tâche n'est pas d'apprendre des règles formelles mais d'acquérir suffisamment d'intuitions, de perceptions intérieures sur la manière dont on se déplace dans l'espace pour permettre la transposition de ce savoir intime en programmes qui conféreront le mouvement de la tortue* » (p. 255).

Dans le sillage de LOGO, Kay et Goldberg (1977 ; Goldberg, 1979) développent le langage de programmation SMALLTALK et DYNABOOK, dispositif qui se présente sous la forme d'un outil carnet qui contient des éditeurs de textes, de dessins et de programmes musicaux. Grâce aux différentes formes de représentation, les idées peuvent être matérialisées et manipulées (simulation d'expériences de laboratoire, exploration de différents scénarii de résolution de problème) et le parcours d'apprentissage balisé.

De même, la notion de micromonde naît à la suite des nombreux travaux réalisés autour de LOGO. Initialement, il s'agit d'un domaine miniature dans lequel le bras d'un robot manipule des cubes sur une table. Le terme fut repris par la suite dans un rapport interne du MIT par Minsky et Papert (1972) pour désigner des domaines conçus comme des « *incubateurs de savoir* ». Les micromondes sont les premières applications de l'intelligence artificielle de chercheurs férus de modélisation. Afin de réduire le temps d'apprentissage, Hebenstreit (1971) a l'idée d'enseigner non pas les connaissances mais les modèles qui rendent les connaissances cohérentes et par conséquent opérationnelles. Les micromondes qui prolongent les instruments de dessins classiques ont préfiguré les évolutions des interfaces actuelles notamment l'interface graphique. Des programmes tels que WHY et SOPHIE vont tirer pleinement profit des capacités graphiques des ordinateurs qui enrichissent les modes de communication avec la machine. La langue naturelle n'est plus considérée comme le mode de communication privilégié avec la machine. Apparaissent alors des ordinateurs personnels à

interface graphique dont la vocation peut être aussi bien éducative que ludique. De nouveaux objets qui présentent des similitudes à la fois avec les objets de la science et ceux du monde sensible vont peupler des environnements dans lesquels les personnes exercent leur créativité et leur sens de la découverte. Le pays des mathématiques, selon l'expression de Papert, est exploré par l'élève qui lui attribue un sens en référence à sa propre expérience. L'apprenant construit lui-même ses objets puis les relations entre ces objets qui forment à leur tour de nouveaux objets et étudie leurs propriétés de façon interactive. Le micromonde est un « *système axiomatique intuitif* » (Thompson, 1987). La connaissance se construit au fil des évolutions successives du micromonde.

## **3.2 Cabri et Cabri géomètre : un micromonde en géométrie**

Le Cabri « *Cahier de Brouillon Informatique* » est un projet qui a vu le jour en 1982 pour proposer aux mathématiciens un outil d'aide à la recherche en théorie des graphes. Le Cabri géomètre est une adaptation de Cabri à l'enseignement de la géométrie dans le secondaire. Ce micromonde invite les élèves à une manipulation directe. Par la construction dynamique de figures géométriques, les élèves extraient les propriétés géométriques qu'ils doivent distinguer des propriétés perceptives et ce, afin de construire de nouvelles connaissances (Baulac et Laborde, 1987). Le statut de la démonstration en géométrie s'en trouve revisité ; les élèves élaborent des conjectures qui les amènent à découvrir ce qui reste vérifié après les transformations (déplacements, modification des dimensions) appliquées à la figure.

## **3.3 Géoplan**

Comme le Cabri Géomètre se limitait à la géométrie élémentaire de la règle et du compas, et afin d'étendre l'usage de cet outil aux domaines la géométrie analytique et de l'analyse, les logiciels Géoplan et Géospace furent créés (Hocquenghem)<sup>5</sup>. Ce sont des « progiciels » qui servent à créer des imagiciels qui sont eux-mêmes des petits programmes pour illustrer une situation mathématique et montrer une propriété par une invariance graphique. Contrairement aux autres imagiciels, Géoplan et Géospace ne requièrent pas de compétences en programmation chez l'enseignant. Des possibilités d'action sur les objets mathématiques via

---

<sup>5</sup> Association pour l'Innovation Didactique disponible à : <http://www.epi.asso.fr/revue/102/ba2p137.htm>

des commandes ont ainsi été introduites. Géoplan peut s'utiliser de l'école primaire jusqu'au premier cycle de l'enseignement supérieur et permet de créer et de manipuler diverses figures : points, droites, cercles, nombres transformations, repères, courbes, vecteurs, fonctions numériques, suites numériques<sup>6</sup>. Ce logiciel possède une double fonctionnalité :

1. La création d'objets mathématiques pouvant être reliés entre eux
2. La représentation graphique dynamique interactive de ces objets

La création des objets s'effectue par l'activation du menu *édition* qui déclenche l'ouverture de boîtes de dialogue. En outre, les objets créés sont décrits par un texte dans un langage formalisé qui emploie des termes mathématiques usuels. Les paramètres du dessin apparaissent également dans un texte modifiable selon des règles de syntaxe. L'utilisateur crée les figures en tapant le texte adéquat et peut transformer ses attributs physiques comme la couleur du trait ou son épaisseur. Cependant, le texte qui, dans les exercices de géométrie, décrit classiquement une figure (par exemple « soit ABC un triangle isocèle ») n'est pas acceptable en l'état. Hocquenghem (ibid.) explique qu'il faut procéder de la sorte :

- \* B point libre ;
- \* C point libre ;
- \* M médiatrice du segment [BC]
- \* A point libre sur la droite M

Le logiciel offre une autre particularité : la valeur des variables est secondaire ; c'est donc à dessein qu'est prévue « *une description de la figure ne contenant pas les valeurs actuelles des objets* » (ibid.). Les valeurs se modifient de façon dynamique par le biais du clavier, de la souris, des animations ou des boîtes de dialogue. « *Ainsi les variables sont-elles identifiables comme des objets changeant de valeur et les liaisons entre variables se manifestent-elles de manière visuelle* ». L'univers de Géoplan se rapproche des expressions algébriques mettant au premier plan la structure de la figure. Hocquenghem (ibid.) conclut que l'introduction d'un nouvel outil ne se contente pas d'être un moyen pédagogique supplémentaire mais apportent de nouveaux éclairages sur les notions enseignées grâce à « *l'imbrication mutuelle des mathématiques et de l'informatique* ». De même, cette distinction entre variables et figures a eu une influence directe sur la façon d'enseigner des professeurs qui ont utilisé Géoplan.

---

<sup>6</sup> <http://www2.cnam.fr/creem/activex.html>

L'équipe CREEM a en 2000 et 2001 incorporé à Géoplan la technologie ActiveX (développée par Microsoft) afin de pouvoir intégrer les fenêtres où fonctionne ce logiciel dans une page de multimédia ce qui rend possible la création de séquences de cours interactives et un parcours d'apprentissage individualisé : l'élève reçoit des consignes et dispose de figures animées. A la suite de ses réponses, un diagnostic est fourni sur le parcours de l'élève. Cette version de Géoplan renforce l'autonomie de l'élève et sa motivation. La compréhension de l'élève est facilitée par la mise en exergue des éléments importants à travers la scénarisation des animations.

### 3.4 TD maths et TD géométrie<sup>7</sup>

Ces logiciels pédagogiques récents exploitent totalement le travail à distance et en réseau ainsi que l'adaptabilité du programme en fonction du niveau de l'élève. Les notions sont présentées dans une carte où des parcours cohérents sont mis à la disposition de l'élève. L'élève progresse en validant des exercices qui sont introduits par des cours synthétiques et illustrés.

« *Les exercices présentent :*

- \* *Un nouvel énoncé généré aléatoirement à chaque tentative.*
- \* *Une difficulté croissante (contrôle des connaissances, résolution de problème, démonstration)*
- \* *Une grande variété de forme en fonction de la discipline (QCM, saisie alphanumérique, programmes de construction...)*
- \* *Des corrections constructives permises par un repérage fin des erreurs de l'élève*
- \* *A chaque nouvelle connexion, l'élève peut reprendre son travail là où il l'avait laissé » (Plaquette de présentation).*

Les enseignants ont la possibilité de suivre le parcours de l'élève à distance mais aussi en temps réel. TDmath assiste le professeur dans l'évaluation des élèves (le serveur fournit des outils d'analyse et de comparaison) et dans la construction de programmes de travail adaptés à chaque groupe.

---

<sup>7</sup> Il est prévu à terme que Tactos soit utilisé avec une version de TDmaths et TDgéométrie rendue accessible. Ces produits sont développés par la société Odile Jacob Multimédia avec qui nous collaborons directement.

---

## 4 Annexe 4 : Psychophysiology du système haptique

Le système haptique ou tactilo-kinesthésique mobilise de façon directe et simultanée la perception cutanée et la perception proprioceptive. Ce système englobe la peau, les muscles, les articulations et les tendons. Les informations issues des déformations mécaniques de la peau et des muscles sont traitées respectivement par les récepteurs cutanés et les récepteurs proprioceptifs. Contrairement aux capteurs visuels ou auditifs qui sont regroupés et localisés dans un organe, ces récepteurs se distribuent sur l'ensemble de la surface corporelle, dans la profondeur des muscles, dans les articulations et les tendons.

### 4.1 Sensibilité cutanée

Les récepteurs cutanés se répartissent selon une densité variable. Elle est maximale sur la face interne des doigts, les lèvres et la langue et minimale sur l'abdomen et les jambes. *« Le fait que la plus grande densité se trouve située à l'extrémité des doigts et qu'elle soit associée à la présence de champs récepteurs de faible dimension contribue à faire de ces territoires l'une des zones corporelles où l'acuité tactile est la plus grande. L'extrême mobilité de cette zone cutanée liée à la musculature digitale finement contrôlée par l'écorce cérébrale a permis de comparer ces territoires cutanés à une véritable « fovéa tactile ». Ce sont ces propriétés particulières qui permettent aux non-voyants d'utiliser le langage Braille dont on sait qu'il ne peut être appris qu'à l'aide d'une petite région digitale distale dont la taille n'excède pas 12 à 15 mm »* (Roll, 1994, pp. 488-489).

Les mécanorécepteurs se différencient par trois types de propriétés (cf. Tableau 2 et Tableau 3):

1. Leur qualité perceptive,
2. Leur surface : ils sont alors réduits-précis (type I) ou étendus-imprécis (type II),
3. Leurs propriétés d'adaptation : rapide ou lente.

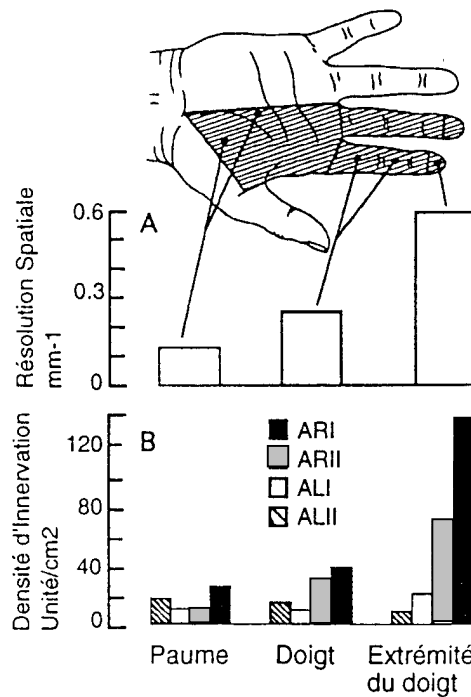
Récepteur	Qualité perceptive
Corpuscules de Meissner	Vibration cutanée superficielle
Corpuscules de Paccini	Vibration cutanée profonde. Indentations transitoires
Corpuscules de Ruffini et Récepteurs de Merkel	Pression cutanée
Corpuscules pileux	Vibration superficielle. Mouvement des poils.

**Tableau 2 :** Principaux mécano-récepteurs cutanés et types de sensations qu'ils sous-tendent (d'après Roll, ibid.)

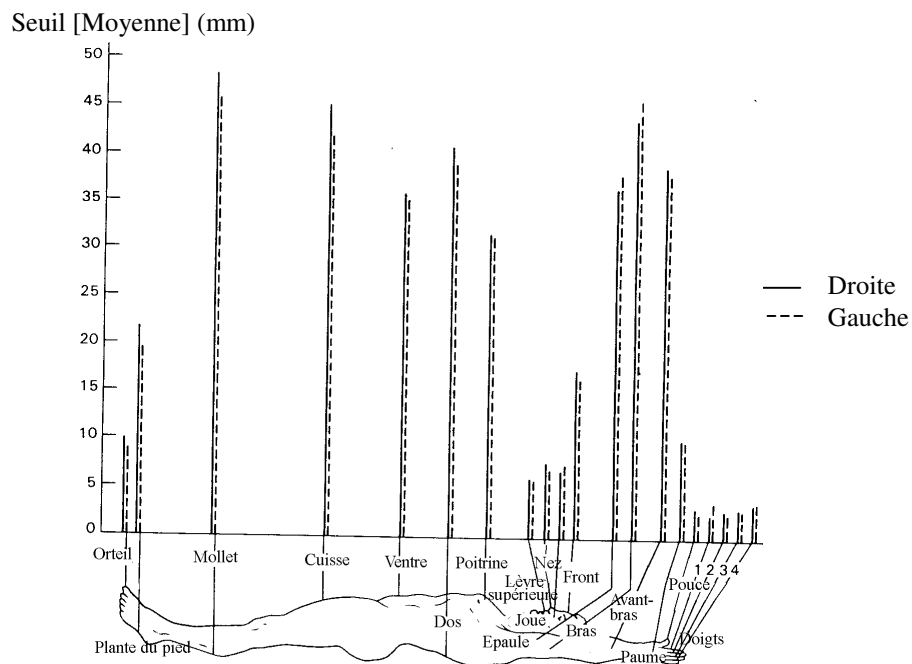
	Adaptation	
	Rapide	Lente
<p><b>Récepteurs de type I</b> <i>Surface bien délimitée et de faible taille.</i></p> <p>Ils comportent des champs récepteurs de forme circulaire ou ovale dont le diamètre ne dépasse pas 2 à 8mm. Leur sensibilité est uniforme et chute brutalement à une certaine distance du centre.</p> <p>Leur densité culmine aux extrémités des doigts. Ils seraient à l'origine de l'importante résolution spatiale de la peau glabre de la main.</p>	<p><b>Les corpuscules de Meissner</b></p> <p>Réalisent un codage fin des détails spatiaux des objets et des déformations de la peau associée à leur manipulation. Ils capteraient les informations relatives aux mouvements.</p>	<p><b>Les récepteurs de Merkel</b></p> <p>Coderaient les informations sur la texture et le contour des objets. « <i>Ils sont particulièrement actifs lorsqu'un objet stimulus coupe le bord de leur champ récepteur</i> » (ibid., p. 492).</p>
<p><b>Récepteurs de type II</b> <i>Surface étendue et mal définie.</i></p> <p>Ils sont localisés dans le derme profond et les tissus sous-cutanés. Leurs champs récepteurs peuvent être très étendus et couvrir par exemple toute la surface d'un doigt. Leur surface connaît une zone de sensibilité maximale pour décroître progressivement. Leur densité est faible, elle évolue selon un gradient mal défini.</p>	<p><b>Corpuscules de Paccini</b></p> <p>Auraient une sensibilité aux attributs temporels du stimulus : « <i>événements mécaniques transitoires, aux déformations rapides des tissus cutanés et au mouvement.</i> » (ibid., p. 494)</p>	<p><b>Corpuscules de Ruffini</b></p> <p>Egalement sensibles aux attributs temporels du stimulus.</p>

**Tableau 3 :** Présentation des différents types de récepteurs cutanés selon leur propriété de surface et d'adaptation d'après Roll (1994).

La résolution spatiale désigne la distance minimale qui doit séparer deux points pour qu'ils soient perçus comme deux points distincts. Elle varie en fonction de la densité des récepteurs. L'acuité perceptive cutanée de la peau glabre de la main permet de discriminer des points distants de deux à cinq millimètres, contre 30 à 50 au niveau du tronc (Figure 1 et Figure 2).

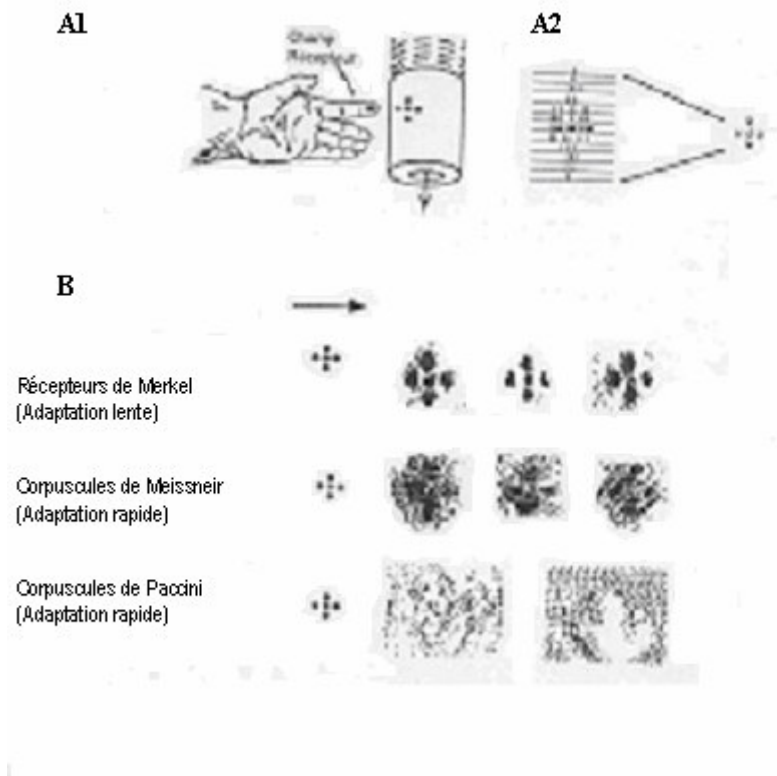


**Figure 1** : Distribution des mécanorécepteurs au niveau de la peau glabre de la main (d'après Johansson et Vallbo, 1983)



**Figure 2 :** Seuil de discrimination tactile du corps (d'après Weinstein, 1968)

Les aptitudes des récepteurs au codage spatial et temporel ont notamment été mises en évidence par Johnson et Lamb (1981). Ces auteurs ont analysé chez le singe la réaction des récepteurs de Merkel, des corpuscules de Meissner et de Paccini à un pattern braille (cf. Figure 3).



**Figure 3 :** Aptitude au codage spatial de différentes catégories de mécanorécepteurs de la peau glabre de la main chez le singe.

Les champs récepteurs sont stimulés à l'aide d'un motif en relief inscrit sur un cylindre (A1). Les potentiels d'action sont enregistrés sur les fibres afférentes correspondantes. Les potentiels d'action sont ensuite ordonnés en fonction des divers passages de chaque partie du motif sur le champ récepteur puis comprimés horizontalement et verticalement afin de retrouver les spatiaux du motif de stimulation (A2). B. Exemples représentatifs du comportement de chaque catégorie de récepteur à un même motif de stimulation (D'après K.O. Johansson et G.D. Lamb, 1981).

Le rôle des afférences cutanées est loin de se limiter à la discrimination de patterns tactiles. Elles transmettent au système nerveux central des informations sur les caractéristiques des objets. Elles influencent ainsi le guidage des actions manipulatoires et auraient une contribution importante dans le réglage fin des commandes motrices de saisie (Johansson & Westling, 1984). La proprioception constitue l'autre modalité prépondérante dans la manipulation d'objet.

## 4.2 La proprioception

La modalité proprioceptive allie le sens du mouvement (kinesthésie) et le sens de la position (statesthésie). La sensibilité de l'appareil moteur serait la source majeure de notre vécu corporel. Les muscles, les tendons et les articulations sont pourvus de récepteurs qui transmettent au système nerveux central des informations sur leur état et leur changement d'état. Cette « *signature de l'action* » (Roll, 1994) rend possible à son tour la réussite de nouvelles actions. Elle est actuellement décrite sous la forme d'un vecteur qui comprend l'accélération, la vitesse, la direction et la durée. Formellement, la relation entre mouvement et retour sensoriel est bijective ce qui garantit une grande stabilité des invariants que ce couplage moto-proprioceptif autorise. Aussi, l'hypothèse selon laquelle le système proprioceptif aurait un statut matriciel (Roll, 2003) est renforcée par le fait que seule la modalité proprioceptive est sollicitée par les positions et les déformations corporelles et seulement par elles, ce qui est un point crucial relativement aux questions des relations entre intermodalité et agentivité (Gapenne, 2003).

Les capteurs proprioceptifs sont localisés dans les fuseaux neuromusculaires, dans les organes tendineux de Golgi et dans les articulations dotées de corpuscules de Ruffini, de Golgi et de Paccini.

- \* Les fuseaux neuromusculaires sont situés au cœur des muscles. Leur densité varie selon le type de muscle. Les fuseaux codent la longueur du muscle et la vitesse de ses variations.
- \* Les récepteurs tendineux de Golgi se trouvent à la jonction entre les fibres musculaires et le tissu tendineux. Ils sont sensibles à la tension et à la contraction des muscles.
- \* Les corpuscules de Ruffini (à adaptation lente) se situent dans les capsules articulaires. Les corpuscules de Golgi sont essentiellement localisés dans les tissus ligamentaires. Les corpuscules de Paccini (à adaptation rapide) se répartissent entre les tissus accessoires des articulations et la capsule. Leur rôle est toujours discuté. Ils coderaient essentiellement les déplacements et les débattements articulaires extrêmes. Ils faciliteraient ou réguleraient la proprioception musculaire au même titre que les afférences cutanées.

## 4.3 Le traitement cortical de l'information sensorielle

Avant d'être projetés au niveau cortical, les messages cutanés et proprioceptifs empruntent deux voies ascendantes : le système lemniscal ou colonne dorsale et le système extralemniscal ou système antérolatéral (voir Tableau 4).

1. Le système lemniscal suit un trajet spinal ipsilatéral et achemine les signaux relatifs aux sensibilités cutanée et kinesthésique d'origine musculo-articulaire.
2. Le système extralemniscal transmet lentement et de façon instable, via des fibres myélinisées et non myélinisées de petit diamètre, des informations relatives aux stimulations douloureuses et thermiques.

*« Sur le trajet de ces voies sont situés un ensemble de relais que l'on peut considérer comme un ensemble de sites de pré-traitement, d'intégration et de contrôle des messages afférents. A partir des derniers relais s'organisent des projections vers le cortex cérébral où sont accueillies et traitées les informations tactiles en vue de leur élaboration perceptive » (Roll, 1994, p. 506). Lors de ces relais, les informations subissent des transformations dont l'origine peut être centrale ou périphérique. Ce type de traitement serait associé à l'activité sensori-motrice notamment à l'exploration manuelle d'objets. Des mécanismes d'inhibition ou d'accès cortical privilégié viendraient modifier les seuils perceptifs et la taille des champs récepteurs. « C'est dans un tel cadre que les phénomènes attentionnels pourraient trouver leur substrat neurobiologique. » (ibid., p. 509).*

Les progrès de l'imagerie cérébrale accréditent l'existence de territoires spécialisés dans le traitement des informations issues des différentes modalités sensorielles. Ces territoires sont appelés aires corticales primaires. D'autres territoires, nommés aires associatives, seraient chargés de mettre en relation les informations sensorielles primaires d'une part entre elles et d'autre part avec les aires motrices. Chacun de ces territoires associatifs comporte à son tour des zones spécialisées dans le traitement d'un aspect du message sensoriel. Les principales aires corticales impliquées dans le toucher sont (Gentaz, 2000) :

1. les aires somesthésiques,
2. l'aire motrice primaire,
3. les aires pariétales postérieures et pré-motrices,
4. le cortex préfrontal et le système limbique.

- ***L'aire somesthésique primaire SI et secondaire SII***

Les messages sensoriels s'y distribuent selon une carte somatotopique<sup>8</sup>. *Ces aires sont organisées en colonnes cellulaires affectées aux divers sous-modalités tactiles* » (Roll, 1994). Les colonnes dont le diamètre varie entre 0,2 et 0,5 mm sont perpendiculaires à la surface du cortex. Elles constituent des modules fonctionnels élémentaires. Le fonctionnement des cellules des aires somesthésiques présente des similitudes avec celui des récepteurs sensoriels périphériques (Costanzo & Gardner, 1981). Johnson et Hsiao (1988) ont mis en évidence chez le singe une analogie entre les caractéristiques du stimulus (une lettre en relief appliquée à l'extrémité du doigt) et la configuration d'activité des cellules corticales.

- ***L'aire motrice primaire***

A ce niveau, les afférences tactiles servent à élaborer les fonctions de programmation, de guidage et de régulation. Son organisation somatotopique révèle une carte de la musculature. Les neurones de cette zone sont associés aux informations somesthésiques.

- ***Les aires pariétales postérieures et pré-motrices***

Vers les aires pariétales postérieures convergent différents messages sensoriels. Des neurones bi-modaux accueillent les stimuli tactiles et visuels. D'autres sont activés par des données somesthésiques et motrices. Cette zone où s'établit la jonction entre les données de l'environnement et les messages proprioceptifs pourrait, d'après Roll (1994), être le lieu de construction du corps propre. Les aires pré-motrices ont une fonction d'organisation des mouvements.

- ***Le cortex préfrontal et le système limbique***

Le cortex préfrontal a des connections avec les aires impliquées dans la perception. Il participe également au contrôle moteur et à la mémorisation à court terme. Il est en relation avec le système limbique, substrat neurologique de la motivation.

---

<sup>8</sup> La somatotopie établit une correspondance entre une surface corporelle donnée et une région corticale.

Système ascendant	Sous-modalités sensorielles	Localisation dans la moelle épinière	Niveaux de croisement	Relais centraux	Projections corticales
<b>Système des colonnes dorsales et du lemnisque médian</b>	Toucher-pression Sens de la position Sens du mouvement	Colonnes dorsales	Bulbe rachidien	Noyaux ventro-postéro-latéral (VLP) et groupe nucléaire postérieur du thalamus	Aires somesthésiques primaires SI et SII ; cortex associatif somesthésique
<b>Système antéro-latéral</b>	Sensibilité douloureuse Sensibilité thermique Tact diffus	Faisceaux antéro-latéraux	Moelle épinière	Formation réticulée bulbo-ponto-mésencéphalique, VPL et groupe nucléaire postérieur du thalamus	Aires somesthésiques primaire SI et SII ; cortex associatif somesthésique.

**Tableau 4 :**Principaux systèmes somatiques ascendants. (d'après J.H. Martin, 1983)

Concernant le système proprioceptif, des travaux récents obtenus au moyen d'une IRM 3T lors d'épisodes de perception consciente d'un mouvement corporel segmentaire induit par stimulation vibratoire ont permis de mettre l'implication de zones corticales spécifiques : les cortex prémoteur, sensori-moteur, pariétal gauche et cingulaire ainsi que l'aire motrice.

Comme le souligne Roll (1994) l'organisation du système haptique ne s'oppose pas à une importante plasticité cérébrale : « *notamment au niveau cortical, où des réorganisations territoriales peuvent se mettre en place en réponse à la fois à l'occurrence de dysfonctionnement périphériques, de lésions centrales ou de comportements spécifiques* » (p. 512).

## 4.4 Plasticité cérébrale

Bach-y-Rita (1972) définit *la plasticité cérébrale* comme les capacités du système nerveux central à compenser les pertes causées par des lésions. Les aires cérébrales saines sont alors

en mesure de remplir des fonctions antérieurement assumées par d'autres tissus neuronaux. Bach-y-Rita (1981a, 1981b) considère deux mécanismes de compensation nerveuse :

1. L'arborisation terminale ("*Sprouting*") ou bourgeonnement: ce phénomène se produit lorsque les cellules intactes s'étendent et prennent la place des cellules détruites. Ce mécanisme s'avère approprié quand les cellules intactes possèdent les mêmes fonctions que les cellules détruites. Ce mécanisme, fréquent au niveau musculaire, est plus rare dans le système nerveux central.
2. Le démasquage ("*Unmasking*") : il s'agit du processus par lequel des synapses vont devenir fonctionnelles suite à la destruction de voies afférentes. Les cellules vont modifier leur seuil de sensibilité pour proportionner l'effet excitateur des voies afférentes intactes (Wall, 1980).

La plasticité cérébrale constitue une des propriétés majeures du système nerveux central. Elle rend possible les réorganisations fonctionnelles. Ainsi, l'usage intensif d'une partie de la surface corporelle peut entraîner sa sur-représentation au niveau cortical. Sterr, Müller, Elbert, Rockstroh, Pantev, Taub (1998) ont comparé les activités corticales de voyants et d'aveugles brailleuses utilisant soit un doigt, soit trois doigts des deux mains. La représentation corticale de la main chez les aveugles qui emploient trois doigts est supérieure à celle des deux autres groupes. Comme la cécité peut être assimilée à une lésion cérébrale (Sampaio, Maris & Bach-y-Rita, 2001) se pose alors la question de ses répercussions sur la réorganisation des aires visuelles.

De Volder (1995) et De Volder, Bol, Blin, Robert, Arno, Grandin, Michel et Veraart. (1997) ont comparé le métabolisme cérébral d'aveugles précoces, d'aveugles tardifs (cécité survenue à l'âge adulte suite à des lésions des voies visuelles périphériques) et de voyants. Le métabolisme a été mesuré au repos et lors de tâches tactiles d'exploration d'objets ou de reconnaissance d'objets tridimensionnels à l'aide de l'Optacon (voir partie 3.1.1). Ces auteurs ont constaté une nette différence dans le métabolisme des aires visuelles primaires et secondaires entre les trois groupes. Un hyper-métabolisme des aires visuelles a été observé chez les aveugles précoces aussi bien au repos que pendant les tâches de discrimination tactile. Le métabolisme des aires visuelles des aveugles tardifs est inférieur à celui des voyants. L'activité corticale des autres aires est similaire chez les trois populations. La cécité précoce modifierait de façon durable l'organisation des aires visuelles. De Volder et ses collègues (1997) interprètent ses résultats d'après l'évolution de la densité des connexions synaptiques. Lors de la maturation des voies nerveuses, les connexions synaptiques redondantes subissent une diminution progressive. Cette « *révision synaptique [...] serait un*

*processus développemental qui favoriserait le maintien des connexions nerveuses activées par les stimulus extérieurs et éliminerait des connexions surnuméraires moins activées par les mêmes stimulus, pour aboutir progressivement enfin à l'organisation corticale de l'adulte. Ce processus constituerait la base de la plasticité cérébrale ».* (Gentaz & Badan, 2000, p.45).

Cette plasticité cérébrale motive les projets de dispositifs de « substitution sensorielle ». Bach-y-Rita (1967, 1972) introduit la notion de plasticité sensorielle qui est une sous catégorie de la plasticité cérébrale. Elle se définit comme la capacité d'un système sensoriel à assumer la fonction d'un autre système sensoriel. Néanmoins, les récepteurs propres à une modalité sont hautement spécialisés et, de ce fait, leur rôle ne peut être rempli par les récepteurs d'autres systèmes sensoriels. Des capteurs artificiels peuvent compenser les capteurs déficients. Par exemple, la caméra utilisée dans le TVSS se substitue aux capteurs visuels et la peau qui reçoit la stimulation devient en quelque sorte un relais dans l'acheminement de l'information. Bach-y-Rita (1972) précise alors que la plasticité se produit alors non pas au niveau des capteurs mais dans les voies neuronales, lors des connexions centrales et des mécanismes de traitement et de d'intégration des signaux. Grâce aux stimuli délivrés par ce type de technologie, le cerveau est ainsi à même d'opérer une compensation fonctionnelle. D'après Bach-y-Rita (ibid.) il est tentant de considérer que les mécanismes neuronaux sous-jacents à l'adaptation aux dispositifs de substitution sensorielle sont similaires à ceux de l'apprentissage et/ou aux capacités de compensation des lésions.

---

## 5 Annexe 5 : logiciel de lecture de traces et grille d'analyse de l'activité exploratoire

### 5.1 Tactplayer

Tactplayer est un logiciel destiné aux expérimentateurs qui permet de visualiser les trajectoires enregistrées et les dessins produits par les sujets. Cette visualisation peut être statique (image) ou dynamique (film de la trajectoire exploratoire). La Figure 4 présente les traces enregistrées lors de l'exploration d'un triangle. Un trait vert matérialise les déplacements de la pointe du stylet sur la forme. Le trait noir correspond aux déplacements du sujet à l'extérieur de la forme.

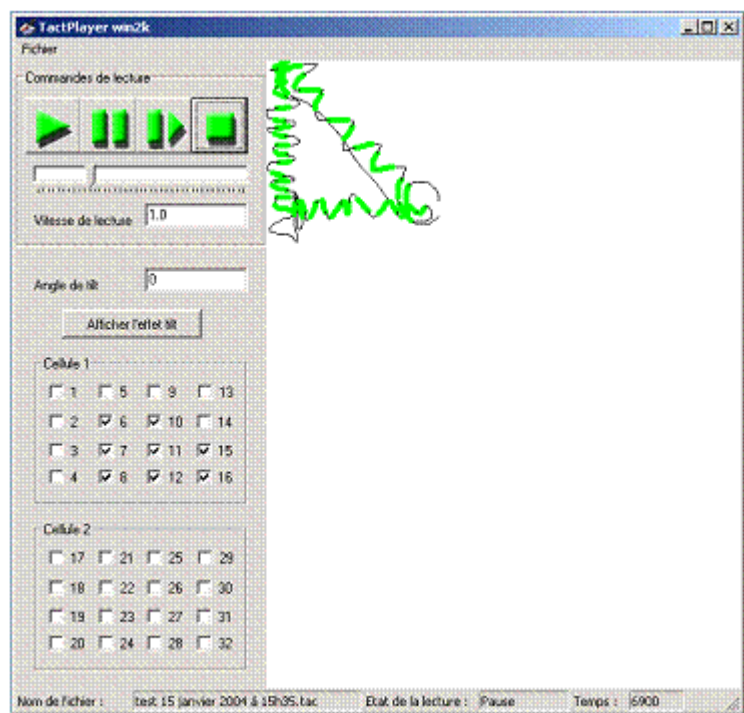


Figure 4 : Le logiciel Tactplayer

## 5.2 Grille d'analyse des explorations sur papier thermogonflé

Afin d'analyser l'activité perceptive de quatre collégiens explorant des formes géométriques en relief nous avons élaboré la grille suivante (cf.

Tableau 5).

FIGURE EXPLOREE	
REPONSE DONNEE	
<b>MAINS</b>	
Mains qui ont touché la forme	
Position initiale	
Mode uni-manuel, bi-manuel ou mixte	Lorsque l'exploration comporte un passage uni-manuel et un passage bi-manuel, alors le mode est considéré comme « mixte ».
Position globale	
<b>DOIGTS</b>	
Doigts qui ont touché la forme	
Doigts appui	Doigts posés sur la feuille mais siégeant à l'extérieur de la forme
Doigts statiques	Doigts immobiles sur la forme
Doigts en micro mouvements	Doigts effectuant sur la forme de petits mouvements rotatifs ou translatifs
Doigts en macro mouvements	Doigts qui suivent la courbe ou parcourent des segments
<b>SUIVI</b>	
Suivi intégral ou suivi partiel	
Continu ou discontinu	
Discontinuités	
Interruptions partielles	
Interruptions totales	

**Tableau 5 :** Grille d'analyse des explorations sur papier thermogonglé

---

## 6 Annexe 6 : Exemples de figures (taille réelle) utilisées dans différentes situation d'étude

Dans cette annexe 6, des exemples de figures à la taille réelle sont présentées. Elles sont classées par situation d'étude.

### 6.1 Perception du nombre, de l'orientation et de la position des sécantes

Dans cette situation d'étude, les sujets adultes devaient déterminer le nombre de secantes croisant une horizontale ainsi que l'orientation et de la position relative de ces segments. A titre d'exemple, la Figure 5 consiste ainsi en un segment horizontal coupé, de gauche à droite, par un segment vertical puis par un segment oblique.

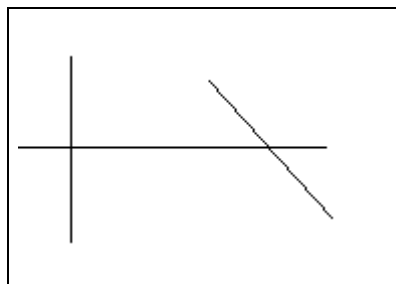
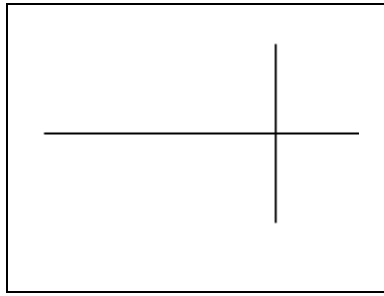


Figure 5 : Exemple de figure utilisée (taille réelle)

### 6.2 Perception de l'orientation d'une sécante et localisation d'une intersection

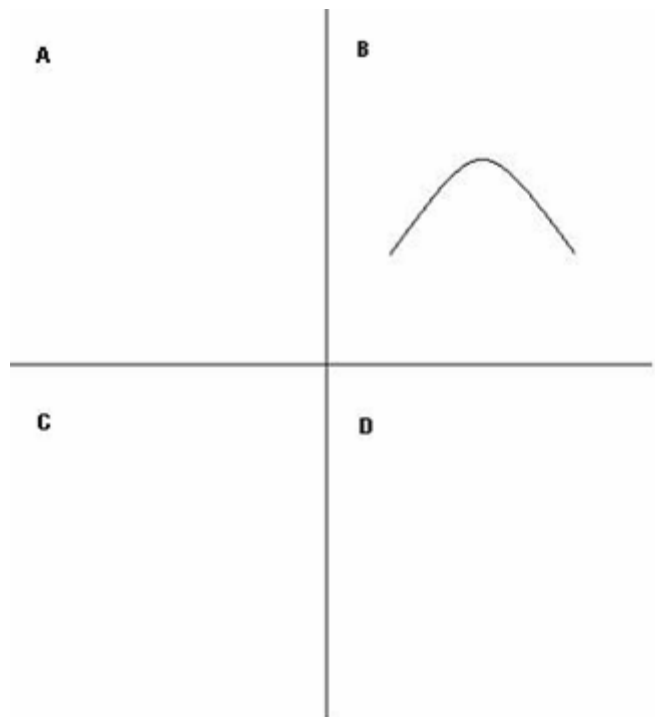
Outre la perception de l'orientation du segment croisant l'horizontale, la tâche consistait également à localiser le lieu de l'intersection. Ainsi, dans la Figure 6, le lieu d'intersection entre le segment vertical et le segment horizontal se situe au  $\frac{3}{4}$  du segment horizontal.



**Figure 6:** Exemple de figure utilisée (taille réelle)

## 6.3 Localisation et lecture d'une forme simple dans un repère

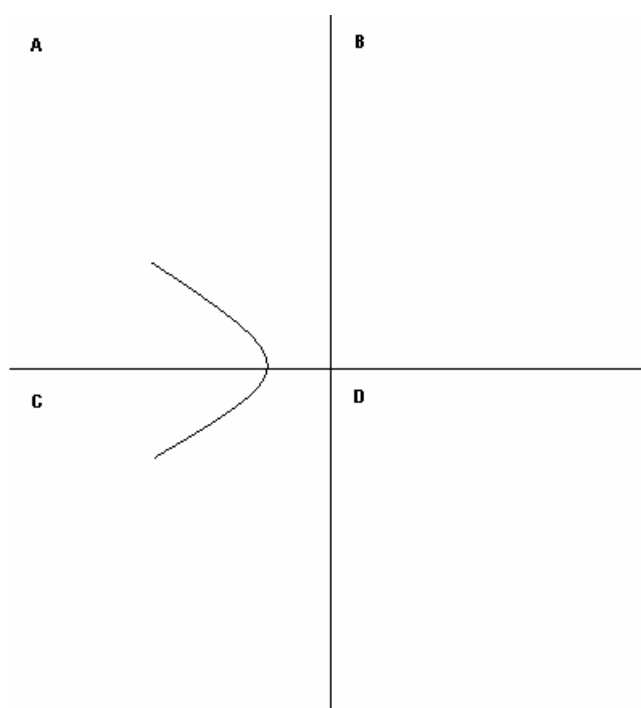
Dans cette situation d'étude, les sujets localisaient une courbe dans un repère et précisaient l'orientation de cette courbe (« n », « c », « u » ou « c inversé »). Dans la Figure 7, la courbe en forme de n, se situe dans le cadran B.



**Figure 7 :** Exemple de figure utilisée lors de la situation d'étude 4 (taille réelle)

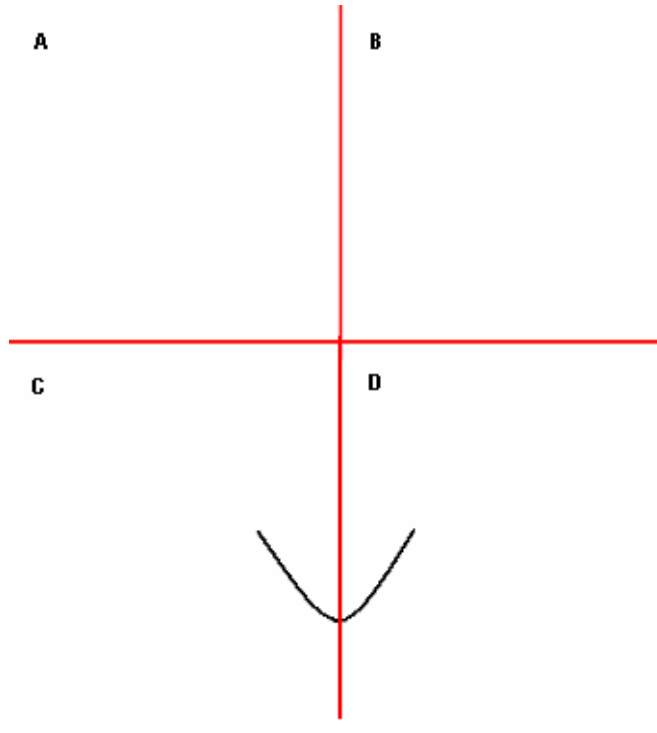
## 6.4 Evaluation du marquage sonore lors de la lecture de forme dans un repère

Lors de l'évaluation 1 ont été comparées deux conditions perceptives. Dans la condition uni-modale, la présence de la courbe et du repère déclenche une stimulation tactile. La Figure 8 a été utilisée dans la condition uni-modale. Il s'agit d'un « c inversé » à cheval entre le cadran A et le cadran C.



**Figure 8:** Exemple de figure (taille réelle) utilisée lors de l'évaluation 1 en condition uni-modale

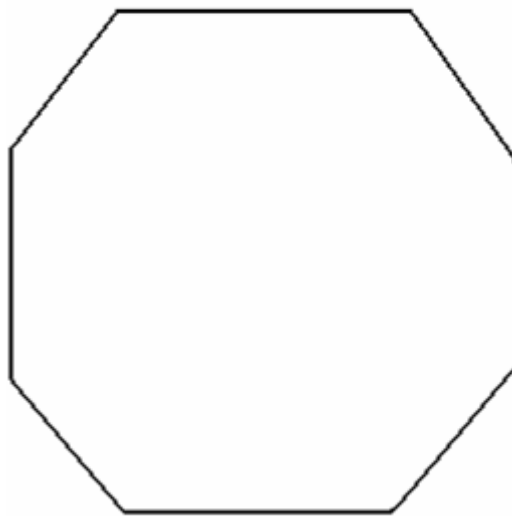
Dans la situation bi-modale le repère a été matérialisé par un trait rouge pour déclencher un bip sonore. Contrairement à la courbe, représentée en noir, il ne donne pas lieu à une stimulation tactile.



**Figure 9 :** Exemple de figure (taille réelle) utilisée lors de l'évaluation 1 en condition bi-modale

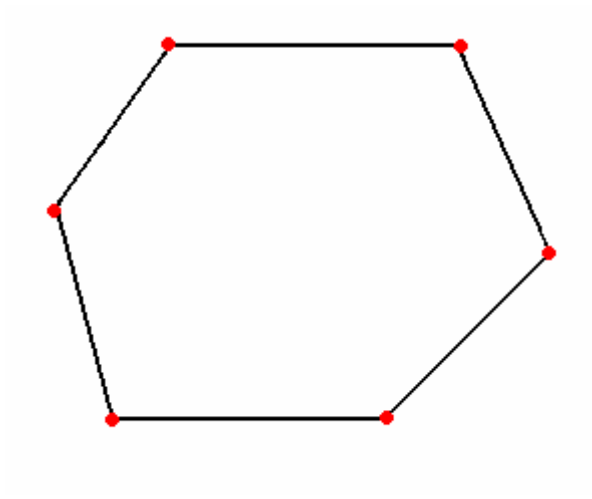
## 6.5 Evaluation du marquage sonore lors de la lecture de polygones

Cette deuxième situation d'évaluation compare à nouveau les conditions uni-modale et bi-modale. Les formes à percevoir sont des polygones. La Figure 10 représente un octogone irrégulier utilisé dans la situation uni-modale.



**Figure 10 :** Exemple de figure (taille réelle) utilisée lors de l'évaluation dans la condition uni-modale

Dans la situation bi-modale, des éléments de la figure sont matérialisés par un point rouge. Ainsi, dans la Figure 11 les six sommets de l'hexagone irrégulier activent une stimulation sonore.



**Figure 11 :** Exemple de figure (taille réelle) utilisée lors de l'évaluation dans la condition bi-modale

## 6.6 Localisation d'une droite dans un repère orthonormé

Dans cette situation d'étude, les figures consistent en un segment situé dans un repère orthonormé. Les sujets avaient pour tâche de percevoir l'orientation du segment et, dans la mesure du possible, de déterminer les coordonnées de ses extrémités. Par exemple, dans la Figure 12, le segment horizontal à cheval entre les cadrans A et C a pour extrémités les points  $(-1, 2)$  et  $(-1, -2)$ .

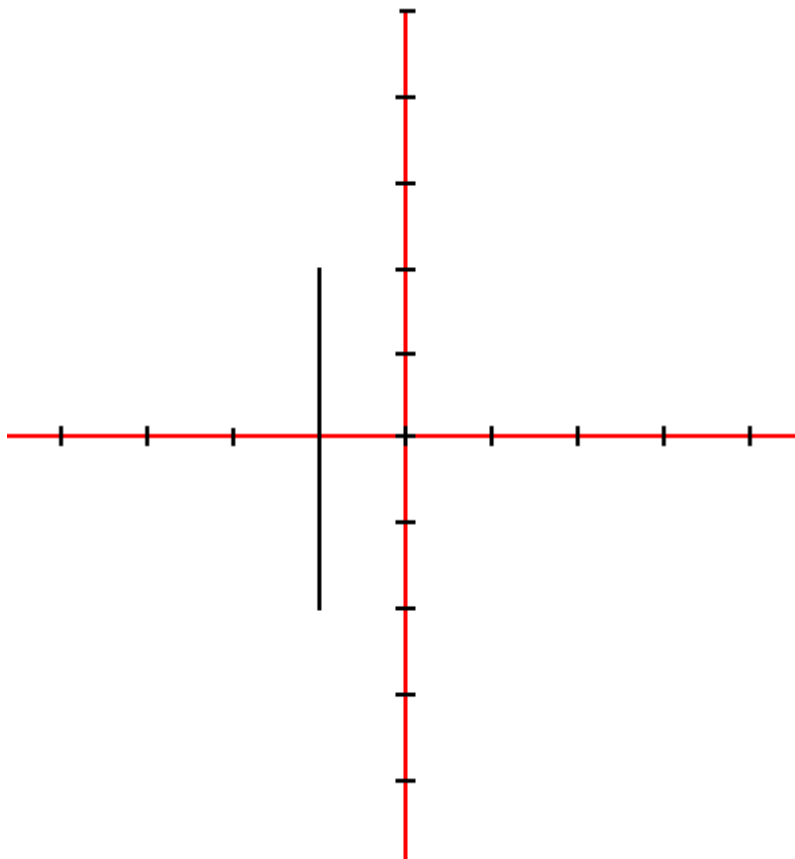


Figure 12 : Exemple de figure utilisée (taille réelle)

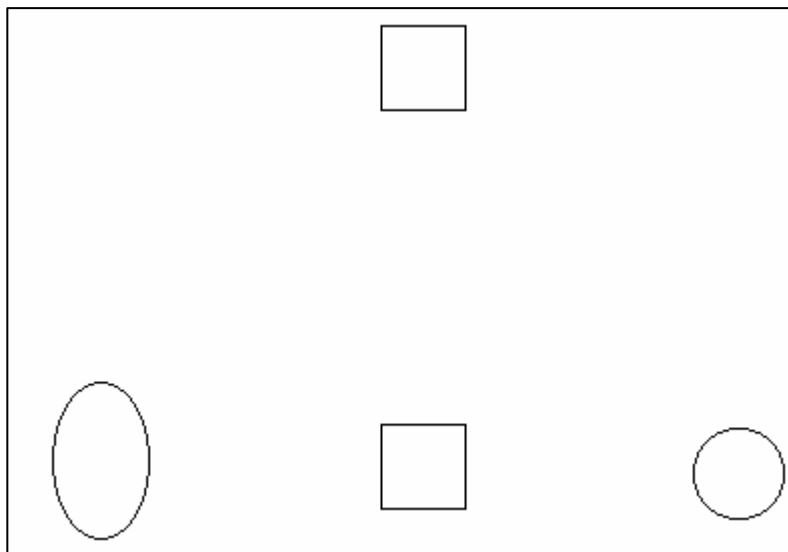
## 6.7 Etude sur la catégorisation

Au cours de cette étude, réalisée par Elodie Blomme, trois types de tâche de catégorisation furent proposées aux quatre collégiens :

1. Une tâche de reconnaissance
2. Une tâche de tri spontanée
3. Une tâche d'appariement

- **La tâche de reconnaissance**

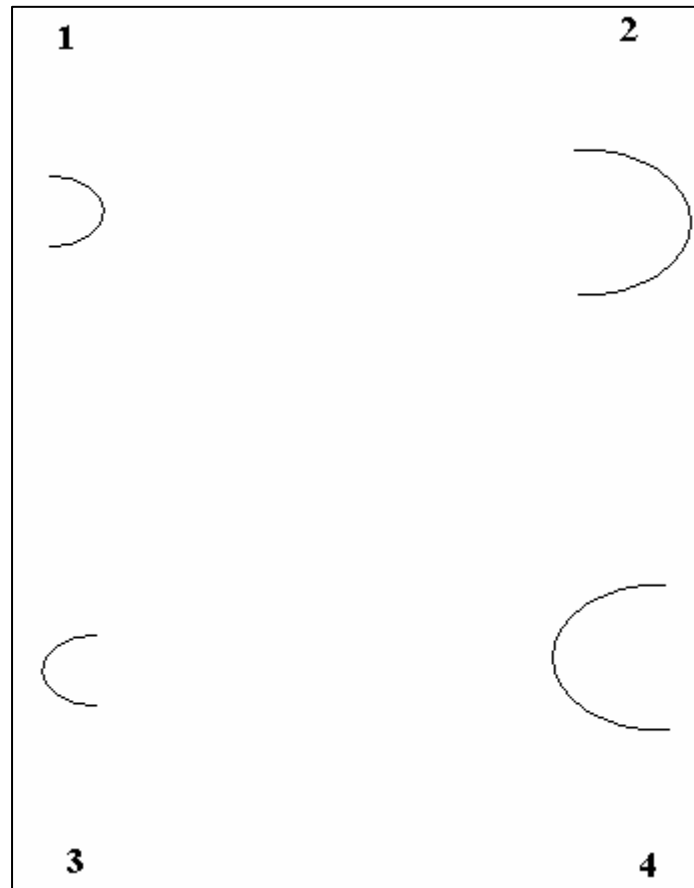
Après avoir exploré une cible, les sujets devaient retrouver la cible parmi trois éléments. Ainsi, dans la figure Figure 13, l'élément du milieu est celui qui correspond à la cible.



**Figure 13** : exemple de figure utilisée dans de la tâche de reconnaissance (taille réelle)

- **Tâche de tri spontané**

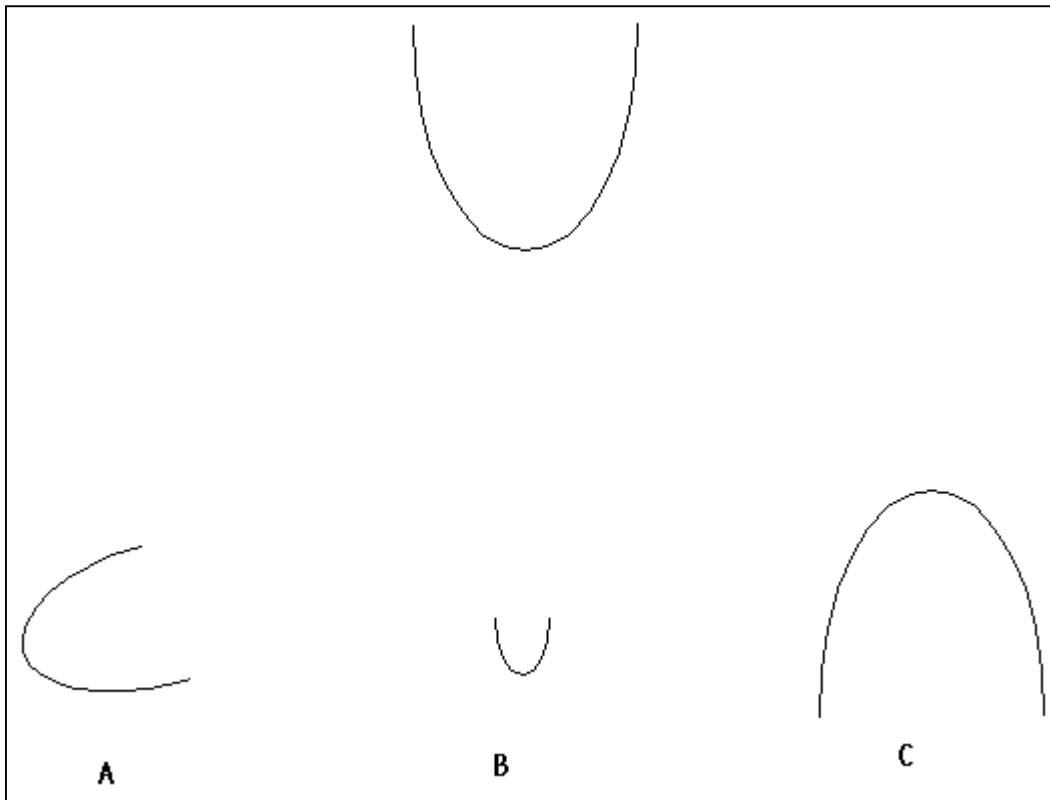
Les sujet explorait quatre éléments puis constituaient deux groupes en associant « les formes qui vont le mieux ensemble ». Dans le cas de Figure 14, si la dimension privilégiée est la taille le regroupement sera le suivant : (1, 3) et (2,4).



**Figure 14** : exemple de figure utilisée dans la tâche de tri spontané (taille réelle)

- **La tâche d'appariement**

Elle consiste à choisir parmi trois éléments « celui qui va le mieux » avec l'élément cible précédemment exploré. Dans la figure 14, si l'appariement s'élabore selon une stratégie dimensionnelle et que la dimension privilégiée est l'orientation alors l'élément choisi sera B. En revanche, si la sujet opte pour une stratégie holistique, l'élément choisi sera A.



**Figure 15** : exemple de figure utilisée dans la tâche d'appariement (taille réelle)