

N° d'ordre : 3362

THÈSE

PRÉSENTÉE A

L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX I

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGENIEUR

Par Pierre SALOM

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPECIALITÉ : AUTOMATIQUE, PRODUCTIQUE, SIGNAL ET IMAGE

**Visualisation interactive de données volumiques texturées pour la
détection supervisée de failles en imagerie sismique.**

Soutenue le 29 mars 2007

Après avis de :

M. Guy BOY	Président d'EURISCO International	Rapporteurs
M. Jean - Daniel FEKETE	Professeur à l'Université Paris Sud	

Devant la commission d'examen formée de :

M. Yannick BERTHOUMIEU	Maître de Conférences à l'ENSEIRB	
M. Guy BOY	Président d'EURISCO International	
M. Jean-Daniel FEKETE	Professeur à l'Université Paris Sud	
M. Pascal FOUILLAT	Professeur à l'Université Bordeaux 1	Président
M. Sébastien GUILLON	Ingénieur de recherche à TOTAL	
M. Mohamed NAJIM	Professeur à l'ENSEIRB	Directeur de thèse

Cette thèse a été pour moi une expérience scientifique riche et passionnante ainsi qu'une aventure humaine inoubliable. Je garderai un souvenir extrêmement positif de ces années passées au LASIS et pour cette raison je tiens à remercier :

Mohamed Najim pour m'avoir accueilli au sein de son équipe et dirigé ce travail de thèse. Yannick Berthoumieu pour son dynamisme, sa bienveillance et la qualité de son encadrement. Pascal Fouillat, pour avoir accepté de présider mon jury. Les deux rapporteurs de ma thèse, Jean Daniel Fekete et Guy Boy pour leurs critiques pertinentes sur l'ensemble de mes travaux. Sebastien Guillon et Nameen Keskes pour leur confiance et leur disponibilité.

Marc Donias pour son aide précieuse sur de nombreux projets et sa rigueur scientifique. Rémi Megret, Olivier Lavalie, Dominique Jeantet et Pierre Baylou pour leurs conseils avisés et les relectures de mon manuscrit. Javier Becerra, pour son humeur et ses cours d'espagnol. Florence Tyndiuk pour ses encouragements et la qualité de ses remarques. Les informaticiens du LABRI Martin Hachet, Luis Kabongo et Antony Don. Le personnel de l'ENSEIRB Dominique M., Patrick, Jérôme et Dominique F. Mes collègues du LASIS : Regis, Mounia, Sorin, ainsi que l'ensemble des membres de l'ESI.

Ma mère, Anne-Marie, pour son soutien permanent et son amour indéfectible. Mon frère Jean dont je suis aussi fier qu'il peut l'être de moi. Amandine pour son aide constante et pour tout l'amour qu'elle m'apporte au quotidien. Mes nombreux et précieux amis Caro, Jo et Ju, Mathieu et Sabine, Aguiet et Medhi, Dje et Layla, Videau et Karine, Akoy, Bertrand et Berangère, Ring et Julie, Joss et Stef, la famille Sanchez, Brousse.

L'interprétation des images sismiques tridimensionnelles est une étape clé de l'exploration pétrolière. Les enjeux de cette activité sont de produire un modèle des différentes structures, telles que les failles, incluses au sein des données sismiques. Les objectifs multiples de cette thèse, menée en partenariat avec le groupe TOTAL, sont de concevoir, d'implémenter et de valider des techniques innovantes de visualisation et d'interaction aidant à la détection et à la modélisation des failles, supervisée par un interpréteur. Bien que spécifiquement développés à destination d'un contexte opérationnel particulier, les outils proposés s'appliquent plus généralement à l'ensemble des données volumiques texturées ainsi qu'à la segmentation manuelle de structures tridimensionnelles. Ils s'inscrivent dans un cadre théorique et méthodologique

The interpretation of seismic 3D imagery is a step key leading to hydrocarbon exploitation. The challenge of this activity is to produce a model of several geological structures, like faults, embedded in seismic dataset. The aim of this thesis, carried out with TOTAL company, is to elaborate, design and evaluate new techniques of visualization and interaction for fault detection and modelization supervised by a human expert. Even if specially designed for an operational context, our tools are also dedicated to other volumetric data and manual segmentation of 3D structures. The theoretical foundation of our works are based on a pluridisciplinary approach and concerns several scientific fields like experimental psychology, cognitive engineering, virtual reality or human computer interaction .

Chapitre 1

Modélisation de la tâche de détection supervisée de failles 13

1.1 Définitions et modélisation de l'activité 14

1.2 Méthodologie générale pour l'analyse de tâches 17

1.2.1 Interviews et recueil des données 19

1.2.2 Contexte opérationnel : interprétation structurale des données sismiques..... 20

1.2.3 Modélisation de la tâche de détection supervisée..... 24

1.2.4 Analyse de l'activité 27

1.2.5 Solutions envisagées 28

1.3 Synthèse..... 31

Chapitre 2

Visualisation et modélisation cognitive de données volumiques texturées 33

2.1 Modélisation de la perception visuelle 34

2.1.1 Neurophysiologie de la vision 34

2.1.2 Modélisation psychologique..... 37

2.1.3 La perception de la 3D 40

2.1.4 Mouvement..... 41

2.1.5 Contours virtuels..... 42

2.1.6 Imagerie mentale et carte cognitive 44

2.2 Perception visuelle des données sismiques..... 44

2.2.1 Caractéristiques perceptuelles des failles..... 45

2.2.2	Représentation mentale des structures et du modèle structural.....	47
2.3	Proposition de nouvelles techniques de visualisation	48
2.3.1	Méthode de rendu des données sismiques.....	49
2.3.2	Coupe adaptative.....	50
2.3.3	Coupe projective.....	53
2.3.4	Cartes d'orientation 3D.....	57
2.4	Synthèse.....	60

Chapitre 3

	Nouvelles techniques d'interaction pour la détection supervisée.....	63
3.1	Techniques d'interactions et interaction WIMP	64
3.2	Principes informatiques pour l'interaction 3D.....	67
3.3	Exploration adaptative	68
3.4	Segmentation manuelle par pointé dynamique	70
3.4.1	Catégorisation des tâches de sélection.....	71
3.4.2	Approche traditionnelle : le Pointé Statique (PS).....	73
3.4.3	Approche automatique : le Pointé Dynamique Automatique (PDA)	74
3.4.4	Approche bi manuelle : le Pointé Dynamique Manuel (PDM)	77
3.4.5	Comparaison des tâches de sélection pour les pointés dynamiques	80
3.5	Etude des périphériques d'entrée.....	81
3.5.1	Taxonomies des périphériques d'entrée.....	81
3.5.2	Périphériques d'entrée dédiés à la détection supervisée	83
3.6	Synthèse.....	89

Chapitre 4

Evaluation empirique	91
----------------------------	----

4.1 Influence de l'animation pour la localisation..... 92

4.1.1 Psychophysique et théorie de la détection du signal.....	92
--	----

4.1.2 Protocole expérimental.....	95
-----------------------------------	----

4.1.3 Résultats	97
-----------------------	----

4.2 Evaluation qualitative des techniques de pointé..... 99

4.2.1 Evaluation subjective et charge de travail.....	99
---	----

4.2.2 Protocole expérimental.....	102
-----------------------------------	-----

4.2.3 Variables étudiées	103
--------------------------------	-----

4.2.4 Résultats	104
-----------------------	-----

4.3 Evaluation quantitative des techniques de pointé..... 107

4.3.2 Variables étudiées	109
--------------------------------	-----

4.3.3 Résultats	111
-----------------------	-----

4.4 Evaluation de la coupe projective 114

4.4.2 Variables étudiées	116
--------------------------------	-----

4.4.3 Résultats	116
-----------------------	-----

4.5 Comparaison de la souris et de la tablette graphique 119

4.6 Synthèse..... 121

Conclusions et perspectives.....	123
----------------------------------	-----

Bibliographie	127
---------------	-----

Pour ma mère Anne-Marie Abadie,

Introduction

L'interprétation de données numériques tridimensionnelles est devenue de nos jours un support de l'expertise indispensable à de multiples domaines scientifiques tels que l'exploration pétrolière, la médecine moderne, ou l'archéologie... Pour l'exploration pétrolière, l'interprétation vise à l'établissement d'un modèle géologique du sous-sol construit à partir de l'analyse de données 3D obtenues par la propagation d'ondes acoustiques. Ces volumes de très grande taille (plusieurs 100 Go en moyenne), appelés blocs sismiques, sont plus ou moins hétérogènes, complexes et bruités en fonction des milieux étudiés. La segmentation de différentes structures d'intérêts contenues dans les blocs conditionne la pertinence du modèle géologique mise en place.

Du point de vue de la segmentation, il est possible de catégoriser différentes techniques à partir du degré d'intervention de l'utilisateur dans le processus d'extraction. La segmentation automatique sollicite une intervention humaine limitée en faisant appel à un ensemble de calculs algorithmiques. A partir de critères explicites, cette méthode est la manière la plus rapide et la plus économique pour isoler un ensemble d'informations objectives. Ces techniques automatiques ont pourtant un point faible, et non des moindres, la définition de critères explicites. En fonction de la qualité de la donnée, les résultats sont parfois décevants omettant certaines informations et introduisant des artefacts préjudiciables à l'expertise. Dans le cadre d'une donnée sismique, il paraît évident qu'il n'existe à l'heure actuelle aucun critère mathématique qui puisse remplacer la puissance de l'interprétation humaine. Pour cette raison une alternative au processus tout automatisé est la segmentation manuelle qui consiste à marquer directement sur la donnée les différentes zones d'intérêts. Fondée sur la visualisation et le marquage de coupes 2D d'un bloc sismique prises successivement l'une après l'autre, l'approche supervisée traditionnelle, impose conventionnellement la construction mentale des structures 3D à partir de différentes vues 2D. Cette modélisation mentale requiert un effort important en terme de charge cognitive pour l'utilisateur. Une telle solution demeure de plus extrêmement coûteuse en temps et souffre d'un manque évident de reproductibilité.

Dans ce contexte, le travail de doctorat présenté se focalise sur la détection supervisée de fractures issues de l'activité tectonique du sous-sol appelées failles. Notre travail a consisté à proposer des outils d'interaction et de visualisation innovants, conduisant à la construction

efficace par un utilisateur d'un modèle numérique de réseau de failles. Tout l'enjeu de cette thèse a été de proposer des solutions alternatives aux méthodes existantes afin de favoriser la détection et la représentation numérique de ces structures particulières en tirant partie notamment des caractéristiques intrinsèques de la donnée et des événements cibles en terme de stimuli psychovisuels. Ce travail, nécessairement pluridisciplinaire, s'appuie sur les innovations des systèmes informatiques en matière de visualisation tridimensionnelle, et relève d'une nécessité d'anticiper ce que pourrait être l'avenir de l'interprétation sismique. Des disciplines aussi diverses que la psychologie expérimentale, l'ingénierie cognitive, la réalité virtuelle et de manière plus approfondie de l'Interaction Homme - Machine ont pu offrir un cadre théorique et méthodologique cohérent à notre démarche.

Le **chapitre premier** présente quelques définitions issues de l'ergonomie afin de spécifier certaines notions rencontrées dans nos travaux. La méthodologie d'analyse de tâche destinée à produire un modèle hiérarchique de la tâche de détection supervisée est ensuite décrite. Afin de comprendre les concepts et le vocabulaire techniques qui sont propres au contexte opérationnel étudié, nous abordons brièvement les différents stades de l'exploration pétrolière et plus spécifiquement l'étape clé de l'interprétation structurale. Enfin, en nous basant sur le modèle hiérarchique obtenu, un ensemble de spécifications sont énoncées afin d'envisager les enjeux d'un passage de la tâche de détection supervisée vers un environnement graphique tridimensionnel. Les nouvelles tâches d'interaction 3D, nécessaires à l'atteinte des buts fixés par les géologues dans un environnement 3D, sont exposées.

Le **chapitre deux** est consacré à la visualisation des données sismiques tridimensionnelles. Plus particulièrement, nous y étudions les mécanismes perceptuels et cognitifs impliqués dans la localisation et la reconstruction mentale des failles. Dans un premier temps, la perception visuelle et les différentes étapes de traitement qui la constituent sont exposées sous l'angle de la neurophysiologie et de la psychologie. Un certain nombre de définitions sur les contours subjectifs, le mouvement et les images mentales servent à fournir une explication sur les modes de fonctionnement de la localisation et de la reconstruction mentale des failles. A partir de cette analyse, nous proposons une technique de visualisation par *coupes adaptatives* destinée à offrir aux interpréteurs une visualisation temps réel de n'importe quelle coupe de la donnée dans une vue 3D. Une deuxième technique, la *coupe projective* fournit aux utilisateurs une nouvelle opportunité pour analyser la donnée à partir d'une information multicontextuelle élargissant leurs champs d'analyse. Finalement, nous exposons les principes

de fonctionnement des *cartes d'orientation* destinées à aider un interpréteur dans sa construction mentale des failles.

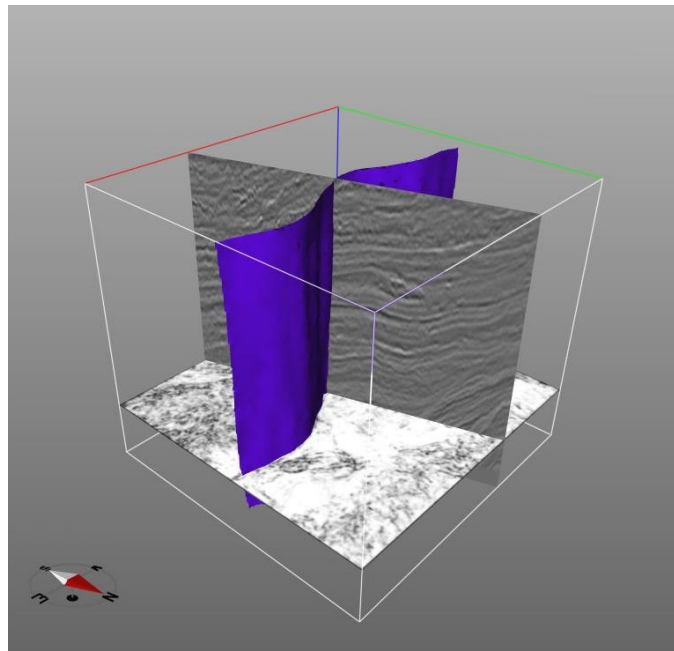
Le **chapitre trois** présente différentes techniques inspirées par le modèle de tâches décrit dans notre premier chapitre, dédiées à un contrôle interactif des outils de visualisation dans le cadre de la détection supervisée des failles. Cette prise en compte de la représentation mentale que les utilisateurs se font de leur tâche est un paramètre indispensable à l'acceptabilité de nos propositions. Ces solutions respectent la logique métier tout en offrant de nouvelles opportunités aux interpréteurs pour interagir avec la donnée. Nous nous intéressons donc tout particulièrement à la tâche de segmentation manuelle pour laquelle deux alternatives à la technique traditionnelle statique seront proposées : les *pointés dynamiques automatique et manuel*. Ces techniques sont basées sur une animation des coupes selon un chemin prédéfini et une sélection des failles à la volée. Cette étude est complétée par une analyse des catégories de périphériques les mieux adaptés au contrôle de ces différentes techniques.

L'enjeu de ce **dernier chapitre** est de valider, par la méthode expérimentale, les propositions et hypothèses que nous avons formulés tout au long de ce manuscrit. En effet, même si nous avons élaboré des techniques en appliquant des règles strictes qui tiennent compte de la spécificité des utilisateurs, des tâches et du contexte opérationnel, il apparaît indispensable de vérifier empiriquement la validité des solutions retenues. En nous basant sur des outils méthodologiques issus de la psychologie expérimentale, différents protocoles ont pu être élaborés afin de mesurer et comparer les solutions envisagées. La première expérience a pour objectif de quantifier l'apport de l'animation pour la localisation des failles à l'aide de la théorie de la détection du signal. A partir d'un signal statique noyé au sein d'un environnement bruité dynamique, nous avons estimé la sensibilité du système visuel en fonction de la vitesse d'animation. La deuxième expérience consiste en une étude qualitative de trois techniques d'interaction menées auprès des interpréteurs dans leur environnement de travail qui démontre le gain de temps obtenu par les méthodes dynamiques par rapport à la méthode statique traditionnelle. La troisième étude est une comparaison de ces mêmes techniques à partir de métriques spécialement élaborées pour quantifier leur pertinence selon des critères de précision et de complétude. La quatrième expérience est destinée à mettre en évidence l'influence d'une visualisation par coupe projective sur les performances obtenues durant un pointé dynamique automatique. La dernière expérience est une évaluation

quantitative de la souris et de la tablette graphique pour accomplir le pointé dynamique d'une surface synthétique.

Chapitre 1

Modélisation de la tâche de détection supervisée de failles



Ce chapitre présente dans une première partie quelques définitions issues de l'ergonomie concernant la définition de la tâche et de l'activité. Nous y présentons ensuite la théorie de l'action de Norman [NOR86][NOR90] qui constitue un modèle psychologique sur lequel s'appuie notre démarche centrée utilisateur. La méthodologie d'analyse de tâche destinée à produire une modélisation hiérarchique de la détection supervisée est ensuite décrite. Afin de comprendre les concepts et le vocabulaire techniques qui sont propres à notre étude, nous abordons brièvement les différents stades de l'exploration pétrolière et plus spécifiquement l'étape clé de l'interprétation structurale. Nous appliquons la méthode d'analyse retenue à ce contexte opérationnel particulier afin d'extraire un modèle hiérarchique. Enfin, en nous basant sur ce modèle, un ensemble de remarques sont énoncées afin d'envisager les enjeux d'un passage de cette tâche vers un environnement graphique tridimensionnel. Les nouvelles tâches d'interaction 3D qui sont nécessaires à l'atteinte des buts fixés par les géologues dans ce nouvel environnement sont exposées du point de vue de la taxonomie de Foley et Al [FOL84][FOL94].

1.1 Définitions et modélisation de l'activité

En ergonomie, une tâche est définie comme un but à atteindre dans un environnement donné au moyen d'actions ou d'opérations successives [TRIC98]. Le but constitue un état final vers lequel souhaite tendre un utilisateur au travers d'une séquence de sous-tâches dont chacune constitue une transformation de l'état de l'environnement. Lorsqu'une tâche est édictée par un élément extérieur à l'utilisateur, on parle alors de **tâche prescrite**. Elle peut être assignée par une autorité supérieure, par l'organisation sociale ou technique, ou encore par les règles du métier [BOY03]. La tâche effective ou **activité** est la mise en œuvre de la tâche, en passant d'un sous but à un autre au moyen d'actions et d'opérations. Les actions concernent généralement les aspects physiques de l'activité tandis que les opérations concernent les aspects cognitifs.

L'analyse de la tâche consiste à identifier et modéliser la tâche telle qu'elle est perçue par l'utilisateur [SEB94] et telle qu'elle serait réalisée dans un système ou dans une situation de référence [TRI98]. Une telle analyse est utilisée pour identifier les différentes étapes qui concourent à l'atteinte d'un objectif donné. La tâche, « prévue » pensée par l'opérateur, est analysée en se fondant sur ses représentations mentales [SEB91]. Ce modèle conceptuel, représentant la séquence des actions à entreprendre, est dépendante de la situation opérationnelle et de l'expérience de chaque utilisateur. Le modèle conceptuel de la tâche obtenu aboutit à une décomposition hiérarchique décrivant l'organisation procédurale de l'ensemble de la tâche. L'activité peut être aussi analysée en observant directement l'utilisateur en situation de travail.

Ces dernières décennies, de nombreux modèles psychologiques ont été proposés pour décrire les tâches qui régissent le lien existant entre un utilisateur et un système informatique. Il est possible d'identifier deux catégories de modèles pour la plupart issus de la psychologie et plus généralement du champ des sciences cognitives: les modèles descriptifs et prédictifs. Les modèles prédictifs se basent sur des mesures quantifiant la performance de l'utilisateur pour la réalisation de la tâche. Cette approche analytique sert, par exemple, à estimer *a priori* le temps ou les ressources cognitives nécessaires à l'accomplissement d'une tâche. Les modèles descriptifs ne reposent pas sur une théorie et un formalisme mathématique mais fournissent un cadre de travail pour décrire le comportement de l'utilisateur. Ce type de

modélisation peut être particulièrement utile pour un concepteur tentant de mettre en relief les limites d'un système pour une situation de travail particulière.

Norman et Al [NOR86] ont proposé un modèle descriptif largement plébiscité par la communauté IHM dans le cadre de la **théorie de l'action**. Durant le déroulement d'une activité, Norman souligne la dichotomie qui existe entre les buts et les intentions de l'utilisateur (variables psychologiques) et les mécanismes du système qui doivent être manipulés (variables physiques). La divergence, entre les variables psychologiques et physiques, peut entraîner de nombreux problèmes à prendre en compte lors de la conception, l'analyse et l'utilisation d'un système interactif. Les buts et le système sont séparés par une **distance d'exécution** et une **distance d'évaluation** que l'utilisateur doit franchir par étapes à chacune de ses actions. Au travers de sa théorie de l'action, Norman illustre ce principe et décrit les sept étapes du processus de réalisation et d'évaluation d'une action (figure 1.1). Cette théorie, outre le fait de mettre en lumière les traitements cognitifs sous-jacents à l'accomplissement d'une tâche, permet d'explicitier la source d'éventuelles erreurs provenant d'une mauvaise réalisation de l'une des étapes.

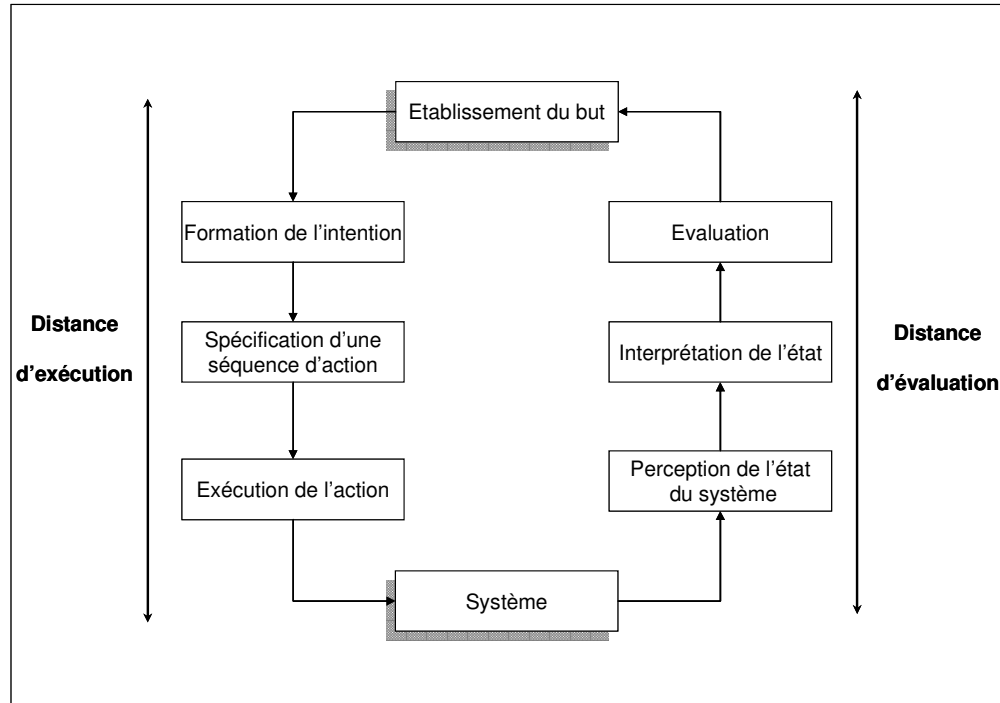


Fig. 1.1 Etapes d'élaboration d'une action par Norman [NOR86].

Comme nous l'avons mentionné, la notion de distance d'après Norman est définie comme l'écart entre le but défini par l'utilisateur et son accomplissement sur le système. Lorsque le système en question est un ordinateur, il est envisageable de donner une description plus précise des deux distances.

La distance d'exécution

L'utilisateur se base sur le but à atteindre et sur l'image qu'il conçoit du système pour élaborer une *intention*. Cette intention consiste à évaluer la distance qui sépare « le but » de la représentation que l'utilisateur se fait du système (modèle mental). La *spécification d'actions* consiste en une planification de la séquence des actions nécessaires à la transformation des variables psychologiques en variables physiques. L'*exécution* est la première action physique correspondant à la réalisation des actions sélectionnées. Dans le cadre d'une interface utilisateur, la réalisation de cette action physique est particulièrement dépendante du dispositif d'entrée.

La distance d'évaluation

La *perception* de l'état du système est obtenue à partir de l'interface graphique et du périphérique de sortie qui présentent les modifications engendrées par l'action. Cette information est ensuite traitée au niveau de la phase d'interprétation, par l'utilisateur, où l'état physique est traduit en état psychologique. L'utilisateur en menant une analyse perceptuelle du système va comparer le résultat obtenu au but et à son intention initiale. En fonction de cette *évaluation*, de nouveaux buts avec de nouvelles intentions peuvent alors émerger pour corriger ou poursuivre l'activité.

Cette théorie de l'action propose un formalisme très utile au concepteur pour l'évaluation d'un système interactif. Il fournit une illustration de la distance qui peut exister entre l'idée que se fait un utilisateur d'un système et son mode de fonctionnement direct. Pour évaluer la qualité de conception d'un système, Norman [NOR90] préconise pour chaque étape de l'action de déterminer s'il est aisé de :

- connaître la fonction du système,
- savoir quelles actions sont possibles,
- déterminer le recouvrement entre l'intention et le mouvement physique,

- savoir comment se réalise l'action,
- estimer l'état du système,
- déterminer le recouvrement entre l'état du système et l'interprétation,
- dire si le système a atteint l'état désiré,

La difficulté d'estimer une de ces étapes, sous-tend un problème de conception qui se fera au détriment du degré d'interactivité du système et provoquera inmanquablement une erreur. Un certain nombre de recommandations peuvent être édictées à partir de cette théorie. Il est, par exemple, conseillé de calquer le plus possible les variables physiques sur les variables psychologiques pour faciliter les étapes de traduction, ou encore de fournir un retour visuel (feedback) immédiat pour réduire la distance d'évaluation [GAL02].

1.2 Méthodologie générale pour l'analyse de tâches

L'analyse de tâches constitue un outil indispensable à tout concepteur informatique désireux de créer un logiciel adapté aux attentes et aux besoins de ses utilisateurs. Cette démarche peut servir à la fois pour définir l'architecture d'un nouveau système mais aussi à évaluer la pertinence de l'existant en terme d'utilisabilité et d'utilité¹. Différents outils méthodologiques ont vu le jour pour l'élaboration de systèmes informatiques issus de cette nécessité de guider la conception des interfaces utilisateurs. Nous allons maintenant évoquer quelques uns de ces outils, comme GOMS [CARD83], et de manière plus approfondie la méthodologie de recueil de données proposée par Sebilotte [SEB91][SEB94] dans le cadre du formalisme MAD (Méthode Analytique de Description de tâches) [SCA90].

Dans la famille des modèles prédictifs, le modèle du **processeur humain** de Card, Moran et Al [CAR83] est un modèle psychologique du traitement de l'information fondé sur une terminologie informatique. Son principe est de décomposer le système du traitement de l'information en trois sous systèmes interdépendants : les systèmes sensoriel, cognitif et moteur. Chacun de ces sous systèmes est composé par une mémoire et un processeur qui possèdent des caractéristiques particulières. Une mémoire est définie par des paramètres de capacité, de persistance et de type d'information mémorisée. Un processeur est caractérisé par le cycle de base qui correspond à sa vitesse de traitement de l'information. Ce modèle a pour

¹ L'utilisabilité se réfère de l'adéquation du système par rapport aux capacités cognitives, motrices et sensorielles de l'utilisateur. L'utilité précise l'adéquation du système par rapport aux besoins de la tâche réalisée. [GAL02]

principal intérêt de fournir, aux informaticiens, une vision compréhensible du traitement de l'information en terme de psychologie cognitive. Néanmoins, le processeur humain n'est pas intrinsèquement un modèle de conception et c'est pour dépasser cette limite que la méthode **GOMS** (goals, operators, methodes, rules) a été conçu par Card et Al [CARD83]. Cet outil d'analyse des performances et de modélisation de l'activité a largement fait ses preuves dans l'évaluation des interfaces utilisateurs. Carroll et Al, illustre dans un exemple réel [CAR03], comment l'évaluation par GOMS de stations de travail pour des opérateurs téléphoniques a permis à une compagnie Américaine d'économiser des millions de dollars en raison d'un problème de conception. Le principe général de GOMS est fondé sur une décomposition de la tâche en quatre sous ensembles distincts :

- les *buts* que souhaitent atteindre les utilisateurs,
- les *opérateurs*, qui constituent les opérations élémentaires (cognitives, motrices, perceptuelles) qu'autorise le système,
- les *méthodes* qui sont les séquences d'opérateurs et de sous-buts que maîtrise l'utilisateur,
- les *règles* de sélection décrivant le choix d'une méthode particulière.

L'idée maîtresse de GOMS est que l'activité de l'expert peut être formulée par des buts et des sous- buts, qui sont réalisés de manière optimale au moyen de méthodes et de procédures particulières. Ce modèle peut être utilisé pour une évaluation de performance qualitative et quantitative d'une tâche accomplie sur un système informatique. Quantitativement, dans le cadre de la technique **KLM** (Keystroke Level Model), il fournit une technique appropriée pour estimer la durée d'une tâche. Qualitativement en utilisant un formalisme spécifique, il peut servir à la conception d'un programme d'apprentissage, de système d'aide et du système en lui-même [CAR03]. Les limites du modèle GOMS, proviennent de la seule description de l'activité et non pas de la tâche conceptualisée par l'utilisateur. Afin d'isoler les représentations mentales des utilisateurs et de comprendre comment serait abordée la réalisation d'une tâche dans une situation de travail générique, une autre méthodologie de l'analyse des tâches est nécessaire.

1.2.1 Interviews et recueil des données

Une manière efficace d'isoler les représentations mentales des sujets, est de recourir aux interviews [SEB91][SEB94]. L'interview est un processus pendant lequel l'interviewer, à l'aide de questions précises, amène un utilisateur à décrire verbalement ses sous-tâches et ses buts. Certains experts sont capables de produire directement une représentation hiérarchique de leur tâche. En effet, les informations concernant une tâche sont, le plus souvent, organisées et enregistrées dans la mémoire à long terme selon différents niveaux. C'est cette hiérarchisation mentale qui influence leur ordre d'accès lors de leur rappel. Pour éviter les digressions et cadrer les sujets dans leur discours, Sebillote [SEB91] propose une méthodologie de l'interview composée de trois étapes :

- Demander au sujet en quoi consiste son travail en enregistrant l'intégralité de son discours.
- A la fin de son exposé, une fois que le sujet n'a plus d'informations à fournir, l'interviewer demande des précisions sur la structure de la tâche. Les buts et les procédures peuvent être isolés à partir de la hiérarchie déduite de la première étape en se basant sur la technique de questions en pourquoi/comment.
- Pour finaliser l'interview, les sujets doivent réaliser un résumé de leur discours afin de s'assurer de la pertinence des propos tenus et valider la structure hiérarchique obtenue.

L'interview enregistrée est ensuite retranscrite par écrit pour servir de document de travail aux analyses. Sebillote préconise une retranscription littérale du discours du sujet afin de ne pas déformer l'information recueillie.

MAD [SCA90] est une méthodologie qui emploie une hiérarchie d'abstraction où une tâche se représente sous la forme d'un arbre constitué de sous tâches. Cette approche autorise à la fois la décomposition hiérarchique et la prise en compte des notions de synchronisation et de relations logiques [SEB91]. A partir des données recueillies auprès des sujets lors de l'étape d'interview, l'ensemble de la tâche est décomposée en sous tâches caractérisées par différents éléments:

- Un but : ce qui est recherché dans l'exécution de la tâche.

- Un état initial : état de l'environnement au moment où la tâche est accomplie.
- Un état final : liste des objets directement créés ou modifiés à la suite de l'exécution de la tâche.
- Des préconditions : ensemble des prédicats exprimant des contraintes sur l'état initial.
- Des postconditions : ensemble des prédicats exprimant des contraintes sur l'état final.

Deux types de tâches sont prises en compte dans MAD : les tâches élémentaires et les composées. Les tâches élémentaires sont indécomposables et constituent des actions à part entière. Les tâches composées sont des enchaînements structurés de sous-tâches. L'ensemble des tâches est agencé au sein d'une structure définie par différents types de constructeurs : séquence, parallèle, boucle, alternative. Nous avons décidé d'adopter cette méthodologie et ce formalisme dans le cadre de l'analyse de la tâche de détection supervisée sur laquelle notre travail se focalise.

1.2.2 Contexte opérationnel : interprétation structurale des données sismiques

Nous venons de présenter la méthodologie de l'analyse de tâches adoptée. Nous allons maintenant introduire le contexte de notre étude ancré dans le champ des géosciences. Plus précisément, cette partie a pour objectif de familiariser le lecteur avec les différents concepts et vocabulaires rencontrés dans l'interprétation des données sismiques et d'exposer notre modèle de la tâche de détection supervisée.

Le pétrole est par définition un hydrocarbure issu de la décomposition anaérobie de microorganismes animaux et végétaux. Enfouie sous des couches sédimentaires, cette matière organique se transforme progressivement au cours des millénaires sous l'action conjuguée de la pression, des bactéries et de la température. Le pétrole migre vers la surface en s'infiltrant par des fissures pour se retrouver piégé au niveau de roches réservoirs sous des couches plus imperméables. La localisation de ces réservoirs à «or noir» est devenue depuis un siècle un enjeu économique, politique et social à l'échelle de la planète. En effet, la raréfaction de ces ressources naturelles nécessite la recherche de nouveaux gisements dans des environnements de plus en plus complexes. Cette difficulté est heureusement largement palliée par

l'apparition de nouvelles méthodes d'investigations basées sur l'évolution des technologies informatiques et électroniques.

L'exploitation de nouveaux sites de production est précédée d'une phase d'exploration qui se décompose en un certain nombre d'étapes faisant appel à des compétences métiers diverses et variées.

- Cas On-shore : dans un premier temps, les géologues vont devoir prospecter directement à terre en étudiant les affleurements rocheux et les indices de surface. Les géophysiciens tentent ensuite à l'aide des techniques sismiques, d'obtenir une représentation numérique la plus précise possible de la structure souterraine.
- Cas Off-shore : la sismique est directement acquise.

Intervient ensuite l'interprétation des données sismiques, à l'issue de laquelle les géologues et les géophysiciens proposent un modèle de l'organisation spatiale du sous-sol. Cette analyse indirecte a pour but de localiser des gisements potentiels et d'implanter des puits d'exploration. Le forage est ensuite réalisé : en cas de succès et de confirmation des réserves, on aboutit à la mise en production du champ pétrolifère et à son exploitation commerciale.

L'étude des données sismiques est une étape cruciale de l'interprétation structurale. Cette activité joue un rôle fondamental dans la prise de décision concernant l'emplacement des puits de forage. La donnée sismique est obtenue à l'aide de la sismique réflexion qui consiste à propager des ondes acoustiques dans le sous-sol au moyen d'une succession de séismes artificiels. La vitesse de propagation des ondes est conditionnée par la nature intrinsèque des couches géologiques. Les ondes sont en effet réfléchies par les interfaces des couches présentant une différence d'impédance acoustique. A terre, ces ondes générées à l'aide d'explosifs enterrés ou par des camions vibrateurs sont récupérées au moyen de géophones (figure 1.2 à droite). En mer, un bateau remorque un canon à air immergé à quelques mètres de profondeur propageant des ondes qu'une ligne de récepteurs (streamers) est capable de recueillir (figure 1.2 à gauche). L'alignement des récepteurs permet d'obtenir pour chacun des tirs une coupe bidimensionnelle. L'ensemble de ces coupes constituera un bloc tridimensionnel appelé volume sismique. A partir d'un modèle de vitesse estimée, cette donnée brute temps est traitée afin de produire une donnée qui servira de base de travail à l'analyse des géologues structuraux aussi nommés les **interpréteurs**.

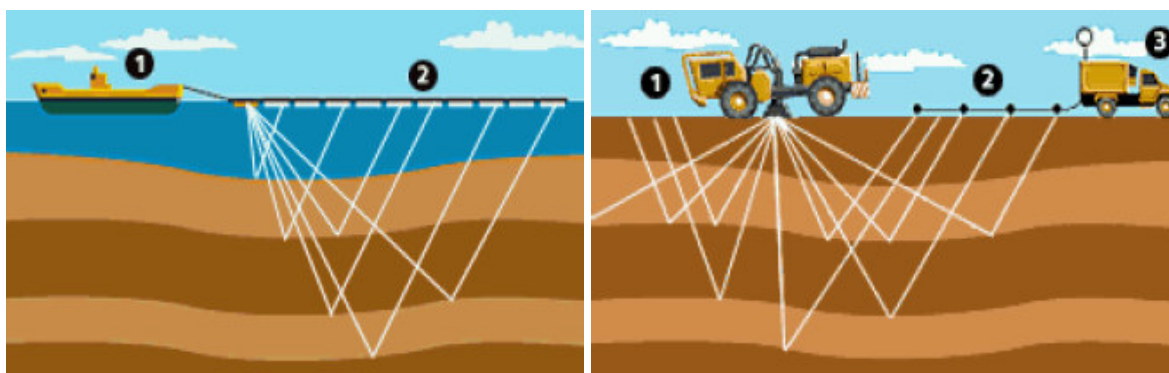


Fig. 1.2 Acquisition des données sismiques en mer et sur terre.

Deux types de structures géologiques intéressent spécifiquement les interpréteurs : les horizons et les failles (figure 1.3).

Les horizons correspondent aux interfaces délimitant deux couches géologiques de nature différente. Après le dépôt des couches géologiques et pendant leur enfouissement, cet empilement de couches ou série sédimentaire peut être soumis à des contraintes tectoniques provoquant des déformations.

Ces déformations se manifestent par des plissements et/ou des ruptures de la série avec décalages des horizons : ce sont les failles (figure 1.3). Selon le régime tectonique en extension ou bien en compression, les failles peuvent être distensives (failles normales) ou bien compressives (failles inverses). Dans ce dernier cas, les terrains plus anciens chevauchent des terrains plus récents. Les failles ont donc une distribution géographique et une géométrie liée aux principes mécaniques qui régissent leur formation (état de contrainte régional et compétences des couches). L'espace induit par une faille est rempli par les roches en place broyées et réduite à l'état de sable, d'argile... Cette zone de faille (Fault core zone), d'épaisseur variable, est donc un mélange des terrains se trouvant de part et d'autre de l'accident. Chaque faille, en fonction de l'étanchéité des éléments qui la composent, peut jouer le rôle de barrière latérale pour les réservoirs, mais aussi de drain longitudinal pour les hydrocarbures migrant vers la surface.

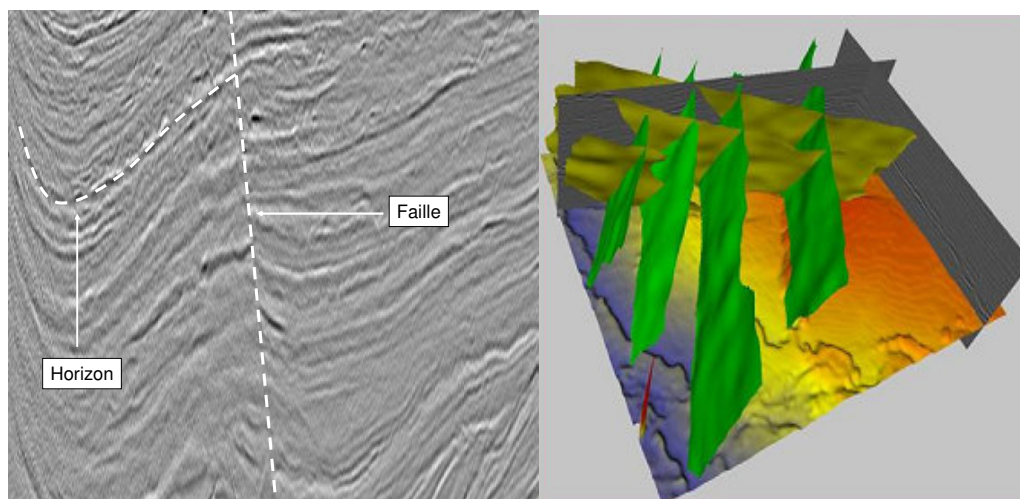


Fig. 1.3 A gauche : section sismique InLine avec failles et horizons. A droite un modèle structural 3D obtenu à l'issue de l'interprétation.

L'objectif du géologue interpréteur est de cartographier un certain nombre d'horizons et de failles contenues dans le volume sismique afin de proposer un modèle décrivant l'organisation spatiale d'une partie du sous-sol. Historiquement, cette description des structures clés était effectuée par l'interprétation des lignes sismiques 2D sur papier. Mais depuis les années 80, de par l'acquisition de campagnes sismiques 3D et grâce aux progrès de l'informatique, les stations de travail ont supplanté la méthode historique du papier/crayon. En s'appuyant sur des ordinateurs capables de traiter un nombre d'informations de plus en plus élevé, cette tâche est de nos jours menée en visualisant la donnée 3D au moyen de coupes bidimensionnelles appelées sections. Trois catégories de sections orthogonales aux axes (X, Y, T) existent en sismique : respectivement *inline* et *crossline* (coupe verticale), *timeslice* (coupe horizontale). La résolution typique de ce type d'images varie généralement entre 12,5 mètres à 25 mètres par pixel. Chacune de ces coupes canoniques est référencée par des coordonnées cartésiennes (x, y, t) dans le volume et présente un point de vue différent sur la donnée. Les sections *inline* et *crossline* fournissent une visualisation adaptée à la sub-verticalité des failles (figure 1.4). Les sections *timeslice*, horizontales, apportent une vision plus globale de l'ensemble du réseau et de l'agencement des différentes failles (figure 1.4). Certaines de ces failles possèdent des orientations qui rendent leur analyse particulièrement difficile au moyen des coupes canoniques classiques. Pour cette raison, les interpréteurs choisissent parfois de définir des sections arbitraires (*random line*) qui sont orthogonales à une ligne d'orientation particulière prédéfinie manuellement en *timeslice*.

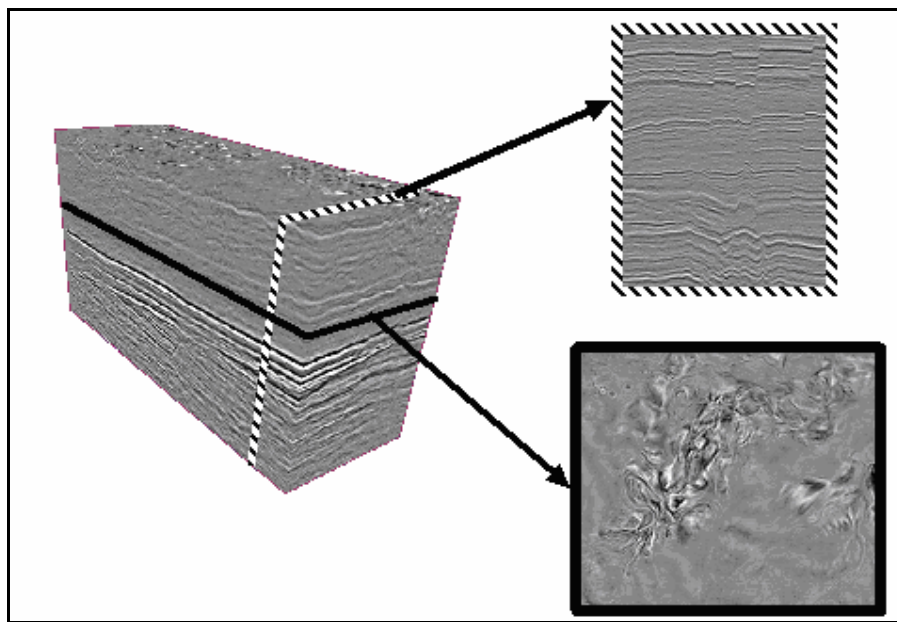


Fig. 1.4 Volume sismique, coupe crossline (bordure hachurée) et timeslice (bordure pleine).

En raison de la multiplicité et du volume des données sismiques 3D par rapport aux nombres d'interpréteurs en activité et au délai imparti à l'interprétation, les techniques de traitement d'images sont apparues incontournables pour accélérer le processus d'interprétation. Des algorithmes, capables d'isoler certains attributs de la donnée (amplitude, phase, fréquence, cohérence ...) facilitent l'analyse visuelle des structures étudiées. L'attribut de cohérence, [BAH95] par exemple, calcule le décalage optimal en terme d'intercorrélacion entre plusieurs traces voisines. Le volume ainsi traité permet de mettre en évidence les failles contenues dans la donnée. La segmentation des failles et des horizons, indispensable à la pérennisation de l'expertise, est réalisable au moyen de processus automatiques ou manuels. Les algorithmes de segmentation automatique (autopicking) des horizons sont capables de réduire de manière drastique la durée d'interprétation. En revanche, pour la détection des failles, les méthodes assistées par ordinateur restent encore à l'heure actuelle beaucoup moins efficaces. Pour cette raison, la détermination des réseaux de failles reste majoritairement un processus supervisé effectué « à la main » par un interpréteur directement sur la donnée.

1.2.3 Modélisation de la tâche de détection supervisée

Suite à une série d'interviews menées auprès des experts et en utilisant le formalisme MAD, une décomposition hiérarchique de la tâche de détection supervisée est présentée dans

la figure 1.5. Cette analyse de la tâche doit être envisagée comme une solution particulière plébiscitée par les experts que nous avons rencontrés. Ce modèle constitue un bon support de travail pour l'élaboration de nouvelles techniques de visualisation et d'interaction. Les interviews, menés directement auprès des experts, ont permis d'identifier plus précisément les différentes étapes de la tâche de détection supervisée de failles. Cette tâche se focalise principalement sur un bloc ou volume sismique « temps » provenant d'une campagne d'acquisition spécifique. Dans l'étude qui nous concerne, les géologues disposent uniquement de ce bloc de données, de certaines connaissances régionales du terrain et d'éventuelles interprétations stratigraphiques préexistantes. L'objectif des interpréteurs est d'élaborer mentalement un *schéma structural* et de pérenniser cette expertise en générant un modèle numérique de ce schéma.

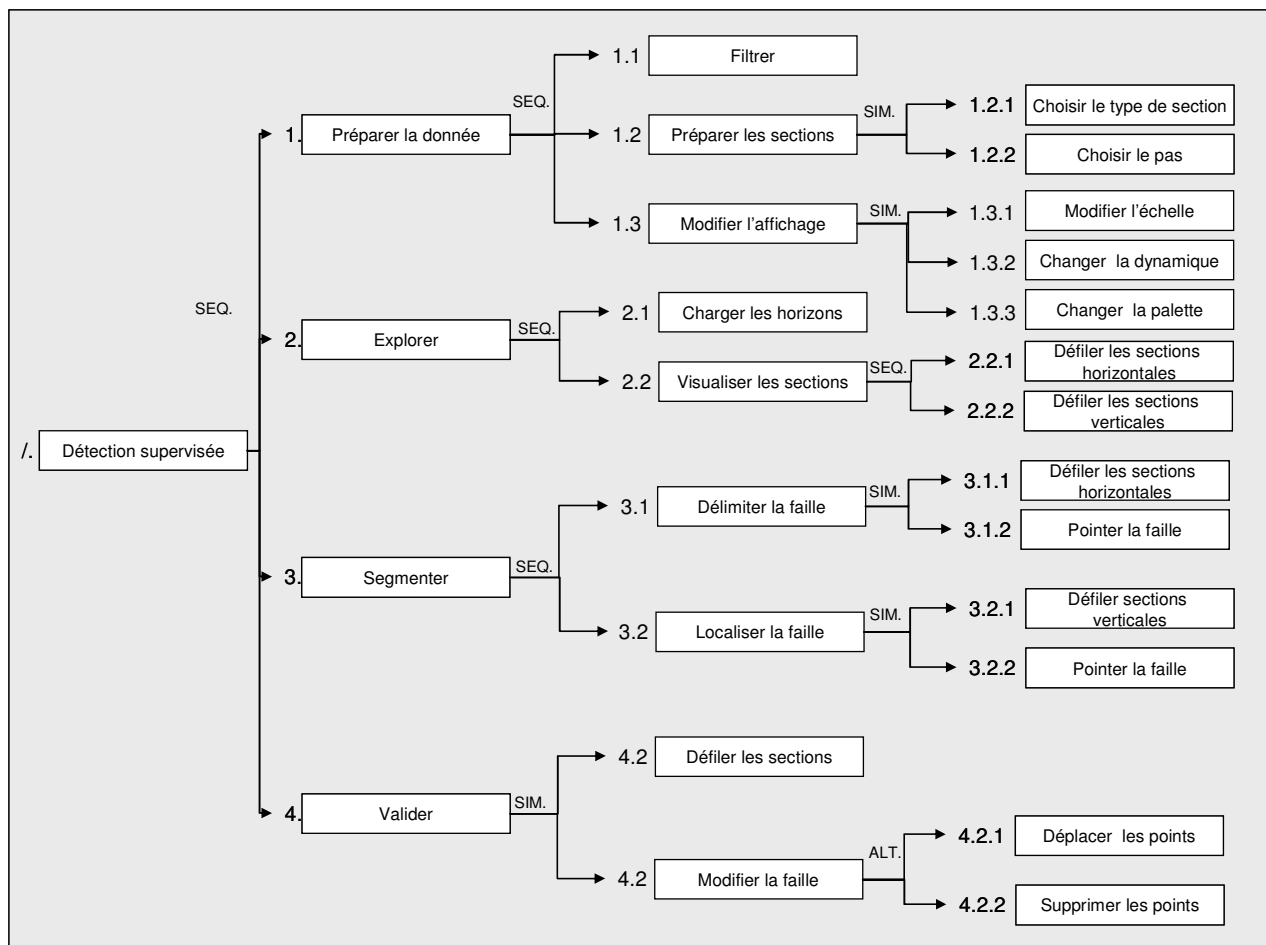


Fig. 1.5 Décomposition hiérarchique de la tâche de détection supervisée de failles.

(1) Préparer la donnée. Préalablement à toute analyse, la donnée peut éventuellement être traitée au moyen d’algorithmes isolant certains attributs (cohérence). Ce type de traitement a pour but d’améliorer la visibilité de certaines structures et de faciliter leur détection (**1.1**). L’interpréteur doit ensuite sélectionner la catégorie des plans de coupes à l’aide desquels le bloc sera visualisé : *inline*, *crossline*, *timeslice* ou *randomline*. Les interpréteurs choisissent généralement d’afficher la version filtrée du bloc en *timeslice* et la donnée non traitée en vue verticale (*inline*, *crossline* ou *randomline*) sur deux écrans séparés, afin de recouper les informations provenant des différentes catégories d’images (**1.2.1**). L’expert définit un pas d’interprétation (**1.2.2**) dont la valeur spécifie les coordonnées des sections qui seront affichées. Cette valeur d’échantillonnage dépend intrinsèquement de la taille de la donnée étudiée. Pour faciliter la localisation de certains événements géologiques, l’échelle des images peut être modifiée (**1.3.1**), la dynamique de l’histogramme des niveaux d’intensités adaptée (**1.3.2**) ou une nouvelle palette de couleur sélectionnée (**1.3.3**).

(2) Explorer. La donnée est ensuite visualisée en *timeslice* afin d’élaborer une première ébauche du schéma structural mental et de déterminer le comportement global du réseau de failles (**2.2.1**). Les coupes verticales sont ensuite défilées en fonction du pas d’échantillonnage retenu (**2.2.2**). Les horizons issus d’une interprétation préalable peuvent être utilisés afin de mettre en évidence les différentes discontinuités (**2.1**). Cette étape est indispensable au géologue pour localiser les failles et établir une ébauche de la cartographie mentale du système de failles.

(3) Segmenter. L’étape de segmentation (pointé, picking) consiste à extraire les failles à l’aide de points déposés à la souris directement sur les sections affichées (**3**). Généralement, pour chacune des failles, l’interpréteur commence à sélectionner un ou deux pixels sur quelques *timeslices*. Cette « pré segmentation » (**3.1**) l’aide à repérer plus facilement la faille qui est ensuite segmentée dans son intégralité en vue verticale (**3.2**).

(4) Valider. Une fois le squelette du réseau de failles défini, la pertinence du pointé est évaluée lors d’une **étape de validation** (**4**). A partir des nuages de points et d’algorithmes de reconstruction, les failles vont être modélisées. La précision et la cohérence spatiale du nuage de points sont les deux critères de cette validation. Les points aberrants seront sélectionnés pour être déplacés (**4.2.1**) ou directement éliminés (**4.2.2**). Le modèle structural obtenu sera le

centre des études destinées à déterminer la position des réservoirs à hydrocarbure et servira de support de travail pour élaborer les scénarios des différents interpréteurs (figure 1.6).

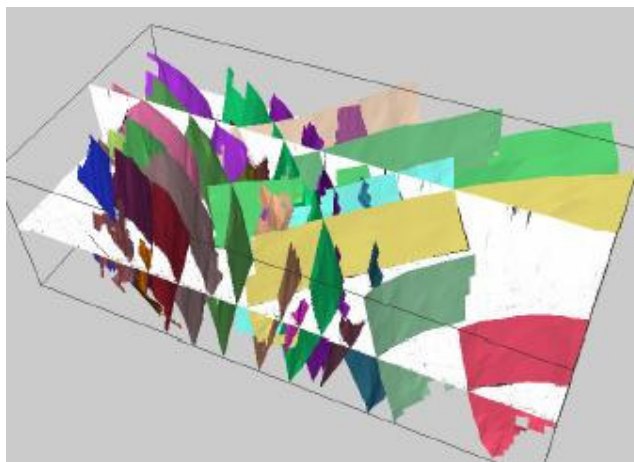


Fig. 1.6 Modèle structural final.

1.2.4 Analyse de l'activité

Le modèle hiérarchique dégagé a permis de guider nos observations afin de mettre en avant les éléments les plus contraignants pour les utilisateurs. Ces observations ont été menées directement auprès des interpréteurs à l'aide du logiciel d'interprétation SISMAGE utilisé par les géologues et les géophysiciens.

Sur le déroulement de l'exploration (2), plusieurs remarques sont à formuler. Au vu des solutions existantes, les interpréteurs visualisent peu de sections sismiques (10 % de la donnée). Pour un volume sismique de taille 500x500x200 visualisé en *inline* avec un pas standard de valeur 10, il ne sera visualiser que 50 sections sur les 500 possibles. Cette contrainte, qui conduit à une analyse parcellaire, est liée à la valeur retenue pour le pas d'affichage. Le choix de cette valeur résulte, en effet, d'un compromis adopté par les utilisateurs entre la taille du bloc et la durée que nécessite l'action de défilement. Ce défilement est réalisé soit en spécifiant les coordonnées de la section dans une boîte de dialogue, soit en cliquant sur un bouton de l'interface graphique qui va itérer les sections le pas retenu. Cette visualisation « discrète » associée à une visualisation planaire, présente entre autre le désavantage de réduire la compréhension de la géométrie 3D de chaque faille.

La segmentation appelée pointé par les spécialistes (3) est sans aucun doute l'étape la plus fastidieuse du processus d'interprétation. Pour marquer les failles, les experts sont contraints de déposer un faible nombre de points (une dizaine tout au plus) à l'aide de la souris sur chaque section affichée. Cette action fastidieuse, répétée sur une centaine de sections et pour chaque faille du bloc, sollicite de la part de l'expert des dizaines de milliers de « clique » de souris. Dans notre exemple, une moyenne de dix points marqués par faille sur chaque section, nécessite 500 cliques. En outre, le défilement discret d'un point de vue de la théorie de l'action impose, pour le franchissement de la distance d'évaluation, une estimation différée de l'exactitude du nuage de points qui est une source conséquente d'erreur d'interprétation.

L'étape de validation rendue obligatoire reste limitée en 2D à la précision du pointé. La cohérence spatiale ne peut s'estimer qu'à partir d'une visualisation tridimensionnelle. Le choix de la méthode adéquate de reconstruction du nuage de points est en dehors du cadre de notre étude, mais on pourra trouver une étude approfondie sur ce sujet dans la thèse de Becerra [BEC06].

Le mode de visualisation 3D existe dans la plupart des logiciels commerciaux d'interprétation en autorisant un affichage conjoint des sections et des failles modélisées dans une scène tridimensionnelle. Pourtant très peu d'interpréteurs l'utilisent à l'heure actuelle durant l'étape d'exploration et de segmentation considérant la visualisation 2D classique comme plus efficace. Nous pensons que ce constat provient d'une absence de techniques d'interaction adaptées à la mise en place de ces tâches dans une vue 3D.

1.2.5 Solutions envisagées

Les spécialistes de l'interprétation de données sismiques [DOR98] s'accordent majoritairement pour admettre que l'avenir de cette activité repose sur une visualisation tridimensionnelle interactive. Faciliter ce passage d'une visualisation interactive 2D à 3D est donc l'enjeu principal de nos recherches. Comme nous le verrons, dans les chapitres suivants, la visualisation 3D est source de nombreux avantages : amélioration de la représentation mentale des failles, facilitation de leurs détection avec l'animation, visualisation de la totalité de la donnée... Néanmoins, même si la tâche et le but à atteindre restent identiques du point de vue de l'utilisateur, ce basculement d'une vue planaire perpendiculaires aux axes à une vue 3D engendre indéniablement une modification du déroulement de la tâche effective. De

nouvelles tâches d'interactions sont donc à envisager afin de proposer des techniques adaptées à cette nouvelle problématique.

1.2.5.1 Tâches d'interactions de bases et congruence dimensionnelle

Foley et Al [FOL84] présentent une liste de tâches « atomiques » d'interactions pour la manipulation de composants graphiques qui peuvent être effectuées au moyen de n'importe quel périphérique d'entrée. Les combinaisons de ces primitives, appelées TIB (Tâches d'Interaction de Bases), sont utilisables pour décrire la plupart des Tâches d'Interaction Composées (TIC) accomplies dans une interface graphique [FOL94]. La liste, ci-dessous, présente la classification de Foley en n'incluant volontairement pas la tâche de chemin (path) que nous considérons comme une composition des tâches de sélection et de position.

- Sélection : choisir un ou plusieurs éléments dans un ensemble de choix (sélection de fichier ou de menu dans une interface graphique).
- Positionnement : changer la position d'un objet graphique en 2D (translation d'une fenêtre ou d'une icône sur le bureau) ou en 3D (translater un objet dans une vue 3D).
- Orientation : effectuer la rotation d'un objet dans l'espace.
- Quantification : spécifier une valeur numérique entre des valeurs minimum et maximum.
- Texte : entrer un ensemble de caractères pour lesquels l'application n'attribue pas de signification particulière (saisir un texte sous un éditeur).

Selon Darken et Al [DAR05], pour réaliser efficacement chacune des tâches de cette taxonomie, une technique d'interaction se doit d'être corrélée avec cette tâche d'un point de vue dimensionnel. Il définit le terme de *congruence dimensionnelle* comme étant la condition par laquelle la technique utilisée correspond exactement à la demande spatiale d'une tâche. De nombreux concepteurs d'interface 3D, notamment en réalité virtuelle, ont souvent proposé des interactions spécifiquement 3D qui s'avèrent au final peu performantes : la plupart des tâches que nous réalisons dans le monde réel étant 2D. Pour Darken, l'avenir des

interfaces utilisateurs 3D réside dans l'utilisation de méthodes hybrides combinant interactions 2D et 3D. Selon cet auteur, les tâches de sélection, de quantification et de texte seraient non spatiales et nécessiteraient l'utilisation de techniques 2D. En revanche, la position et l'orientation ont une caractéristique spatiale plus adaptée à une interaction 3D.

1.2.5.2 Tâches d'interaction pour la détection supervisée

Les tâches d'exploration et de segmentation sur lesquelles se focalisent notre étude (2, 3 de notre modèle de tâche) sont des TIC qui se décomposent en un ensemble de sous tâches. Leur réalisation dans un environnement tridimensionnel, nécessitera un certain nombre de nouvelles actions. Les sous-tâches finales peuvent se définir à partir des TIB de Foley. Les tâches de pointé de faille (3.1.2) est d'après la taxonomie, une tâche de sélection. Le défilement des sections (quelle que soit la vue adoptée) est une tâche de positionnement et d'orientation. Le passage à une interaction 3D ajoute deux TIB supplémentaires de position et d'orientation du point de vue dans la vue 3D par rapport à chaque section affichée. Pour chacune des TIC évoquées, nous pouvons maintenant spécifier les TIB qui les composeront dans la tâche de localisation supervisée en 3D :

Exploration : cette étape fait appel à une manipulation conjointe du point de vue de la scène 3D et des sections sismiques.

Segmentation manuelle : pour chacune des failles détectées lors de l'exploration, l'interpréteur modifie la position, l'orientation de la section et le point de vue. Sur chacune de ces sections, un certain nombre de pixels sont sélectionné le long de la faille.

Le tableau suivant est un récapitulatif des TIB que nous envisageons et du niveau dimensionnel qui leurs sont associées selon Darken. Nous nous baserons sur ces observations pour la proposition de nos techniques d'interaction (chapitre 3) dans le cadre d'une visualisation 3D adaptée (chapitre 2). Il apparaît déjà clairement que la solution, pour être efficace, s'orientera vers une technique hybride combinant les interactions 2D et 3D.

	Position du volume	Orientation du volume	Position des sections	Orientation des sections	Sélection des points
Dimension	3D	3D	3D	3D	2D

1.3 Synthèse

Au travers de ce chapitre, les notions fondamentales de tâches et d'activité ont pu être clarifiées. La théorie de l'action de Norman [NOR86] a été présentée comme un modèle descriptif utile à l'analyse du système. Nous avons ensuite décrit une méthodologie de l'analyse de tâches que nous avons appliquée à notre contexte opérationnel particulier : la détection supervisée de failles sismiques. Après avoir défini les concepts sous jacents à cette tâche, nous en avons proposé une modélisation découlant d'une série d'interviews réalisées avec l'aide de spécialistes du domaine. Ce modèle obtenu à partir d'un formalisme MAD a servi de référence à la compréhension des mécanismes de la tâche dans une vue 2D afin d'isoler les éléments qui sont la source des difficultés rencontrées par les utilisateurs. Enfin, nous avons envisagé comment la détection supervisée pourrait être effectuée dans un environnement graphique tridimensionnel en nous basant sur les tâches d'interaction de Foley et AI [FOL94]. Le chapitre suivant est une réflexion menée sur les traitements de l'information visuelle dans le cadre de l'analyse de données sismiques. Une description de nouvelles techniques de visualisation adaptée à la localisation et la modélisation mentale des failles sera proposée afin de mettre en avant les différents avantages liés à l'utilisation d'une vue 3D.

Chapitre 2

Visualisation et modélisation cognitive de données volumiques texturées

Ce chapitre est consacré à la visualisation des données sismiques tridimensionnelles. Nous y étudions les mécanismes perceptuels et cognitifs impliqués dans la localisation et la reconstruction mentale des failles. L'exploration visuelle d'un volume de données est une tâche particulièrement ardue à mettre en place en raison de la densité importante et de la complexité des informations à extraire. De surcroît, le caractère opaque des images sismiques rend irréalisable l'analyse directe d'une structure géologique dans sa globalité. Pour extraire les informations clés de la donnée, la visualisation menée à partir des coupes 2D reste l'unique solution envisageable. La perte de la troisième dimension oblige l'interpréteur à construire une représentation mentale de chaque structure à partir d'une vision parcellaire de la donnée. Bien que les interpréteurs soient particulièrement rompus à ce type d'exercice, il n'en reste pas moins que la multiplicité des volumes sismiques étudiés et l'obligation d'obtenir les résultats les plus fins possibles, occasionnent une pénibilité significative de cette tâche. Pour cette raison, nos recherches se basent plus particulièrement sur une méthode de visualisation combinant des aspects 2D et 3D capables d'alléger la charge mnésique engendrée par ce processus.

Dans un premier temps, la perception visuelle et les différentes étapes de traitement qui la constituent sont exposées d'un point de vue neurophysiologique et psychologique. Un certain nombre de définitions sur les contours subjectifs, le mouvement et les images mentales servent à fournir une explication sur le fonctionnement des mécanismes de localisation et de reconstruction mentale des failles. A partir de cette analyse, nous proposons une technique de visualisation par **coupes adaptatives** dont l'objectif est d'offrir aux interpréteurs une visualisation temps réel de n'importe quelle section de la donnée au sein d'une vue 3D. Une deuxième technique, la **coupe projective** fournit un outil proposant une information multicontexte capable d'élargir le champ d'analyse. Finalement nous exposons les principes

de fonctionnement des **cartes d'orientation** destinées à aider l'interpréteur dans sa construction mentale du réseau de failles.

2.1 Modélisation de la perception visuelle

Avant d'amorcer la présentation des solutions mises en place, attachons-nous à décrire les différents mécanismes du traitement de l'information par le système visuel humain. Cette étape est nécessaire afin d'établir les concepts cruciaux qui régissent la perception visuelle dans le cadre de la détection supervisée. Nous pourrions ainsi émettre par la suite un certains nombres d'hypothèses concernant l'extraction visuelle et la construction mentale des failles.

La perception est un processus biologique qui offre la faculté à la majorité des organismes vivants d'appréhender leurs environnements internes et externes. L'organisme humain est doté de capteurs spécialisés, qui sont connectés à une partie du système nerveux central dans le cadre d'une modalité sensorielle. Il est possible d'identifier deux grandes catégories de modalités : les extéroceptives (vue, audition, toucher, goût et odorat) qui renseignent sur l'environnement extérieur et les proprioceptives qui concernent l'état interne de l'organisme (kinesthésique, vestibulaire). Le traitement des informations afférentes, issues du monde qui nous entoure, est décomposable en différentes étapes dont la finalité est l'émergence d'une sensation. La transformation des signaux physiques reçus en activité neuronale soulève encore de nos jours de nombreux questionnements. Pour étudier les mécanismes sous-jacents de la perception, il existe deux grandes classes de méthodes : les méthodes neurobiologiques et les méthodes comportementales. Ces différentes approches appliquées dans le cadre des neurosciences cognitives ont conduit, accompagnées par l'avènement des techniques d'imageries cérébrales, à une ébauche d'explication des principales fonctionnalités de ce processus complexe.

2.1.1 Neurophysiologie de la vision

Selon Marr [MAR82], *la vision est l'ensemble des opérations qui permet d'extraire et de construire, à partir des images bidimensionnelles que forme l'optique oculaire, la structure tridimensionnelle et la composition du monde physique extérieur.* Le système visuel doit être capable d'extraire à partir des images rétiniennes certains aspects utiles pour décider des actes déployés dans les trois dimensions de l'espace, et des pensées qui occupent la scène mentale.

La perception visuelle est donc un processus analytique dans lequel un important flot d'informations est traité par différents sous-systèmes aux capacités fonctionnelles distinctes. Même si nous percevons en temps réel notre environnement comme un tout unifié, le stimulus lumineux est, en réalité, analysé et décomposé en fonction de différentes caractéristiques primitives (intensité, orientation, mouvement...) pour ensuite aboutir à une intégration de ces informations au niveau des différentes aires du cortex cérébral.

Les objets qui nous entourent, sont visibles par le fait qu'ils renvoient tout ou une partie de la lumière provenant de différentes sources diffusant cette énergie électromagnétique. Caractérisée par sa longueur d'onde, la lumière va traverser l'ensemble des couches de l'œil pour être transformée dans un premier temps par les photorécepteurs de la rétine. Deux catégories de récepteurs, les cônes et bâtonnets sont responsables de la transduction du stimulus lumineux en signal électrique interne. Les cônes sont dédiés à la vision photopique (de jour) et aux traitements des couleurs. En effet, il existe trois catégories de cônes (rouge, vert et bleu) chacun caractérisé par un spectre d'absorption particulier. Les bâtonnets utilisés principalement pour la vision scotopique (de nuit) n'existent que sous une seule forme et s'avèrent être d'une grande sensibilité à la lumière. Ces photorécepteurs ne sont pas uniformément répartis sur l'ensemble de la rétine. Les cônes sont prépondérants dans la fovéa : la partie centrale de la rétine qui constitue la zone d'acuité maximale. A l'inverse en périphérie, le nombre de bâtonnets est en augmentation croissante. Les photorécepteurs sont liés par des liaisons synaptiques aux cellules bipolaires spécialisées dans le traitement des variations d'intensité lumineuse. Les cellules horizontales sont responsables d'interactions latérales entre les cellules bipolaires et les photorécepteurs. Les cellules ganglionnaires constituent la dernière couche de ce dispositif rétinien dont la principale activité est de répondre au contraste de luminance.

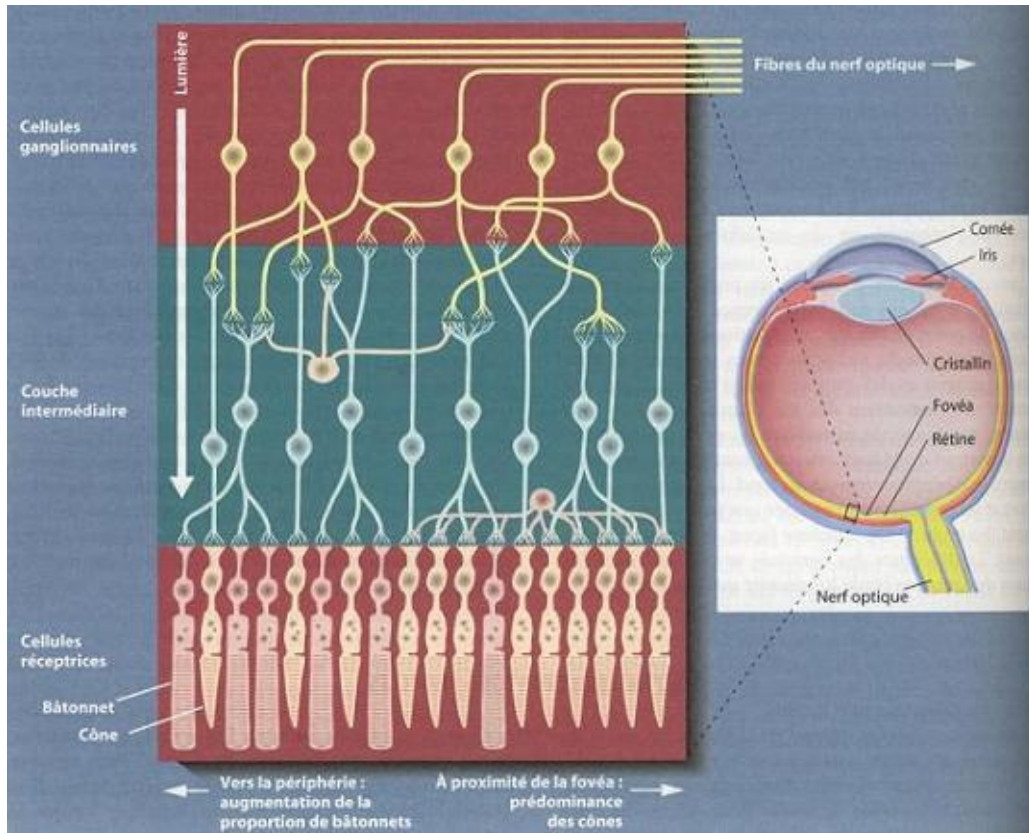


Fig. 2.1 Les différentes couches de la rétine [GAZ01].

Les axones des cellules ganglionnaires forment le nerf optique qui traverse la rétine au niveau de la tâche aveugle. Environ 60% des fibres du nerf optique, provenant de chaque œil, se croisent au niveau du chiasma optique pour aboutir dans le Corps Genouillé Latéral (CGL) du thalamus. Le CGL, premier relais des voies visuelles du cortex, est connecté au cortex visuel primaire (V1) situé dans la partie occipitale du cerveau. Comme les cellules ganglionnaires, les neurones du CGL sont composés par deux régions circulaires ON et OFF associées à un champ récepteur. Ce champ récepteur correspond à une région donnée de la surface de la rétine (et donc de l'environnement perçu). Ces cellules à centre ON ont pour caractéristique principale d'envoyer des bouffées de potentiel d'actions lorsque le centre de leur champ récepteur est éclairé alors que sa périphérie se trouve dans le noir (inversement pour les neurones à centre OFF). Le CGL est de plus composé par des cellules de types P et M qui constituent deux sous systèmes parallèles aux fonctionnalités distinctes. La première, dite parvocellulaire est spécialisée dans la détection des formes et des couleurs. Cette voie est donc passe-bas en terme de fréquence temporelle et passe-haut au niveau des fréquences spatiales [HER01]. La deuxième, dite magnocellulaire est spécialisée dans la perception du

mouvement et de la profondeur : passe-haut en temporel et passe-bas en spatial. Cette ségrégation des voies persiste au niveau cortical.

L'intégration des voies visuelles qui proviennent de chaque œil est réalisée dans le cortex et contribue à la sensation de profondeur. Au niveau du cortex visuel, les neurones sont disposés en fonction des éléments du champ visuel projetés sur la rétine. Ce principe de rétinitopie est à l'origine d'une véritable carte corticale des différentes zones du champ visuel. Des neurones simples et hypercomplexes sélectifs à l'orientation, la longueur ou à la terminaison des lignes sont disposés dans le cortex strié en colonnes de dominance oculaire. Chaque région du cortex visuel reçoit des afférences et envoie des efférences vers les autres régions. La décomposition en deux voies de traitement ventrale (le « quoi ») et dorsale (le « où ») se retrouve après l'aire cérébrale V1. La voie ventrale qui se termine dans le cortex inférotemporal a des propriétés importantes pour la reconnaissance des objets, comme la sélectivité pour certaines formes, couleurs ou textures. La voie dorsale aboutissant dans le cortex pariétal est vouée au mouvement et à la coordination visuo-motrice.

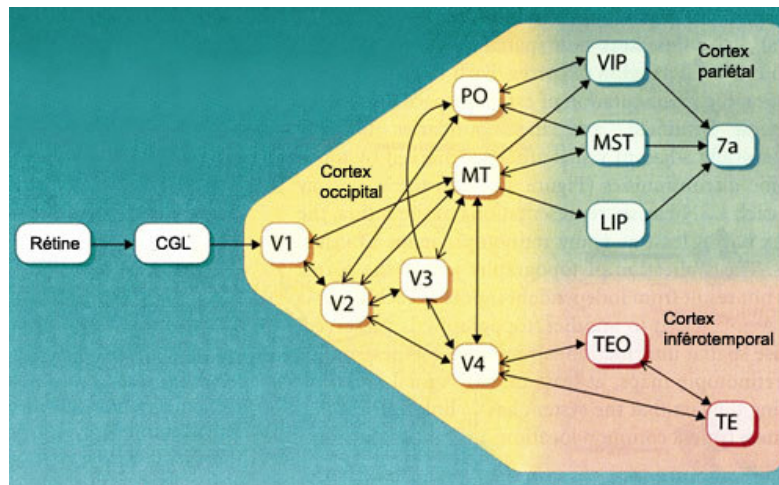


Fig. 2.2 Principales aires visuelles et leurs connexions chez le macaque [GAZ01].

2.1.2 Modélisation psychologique

Dans les années soixante Gibson [GIB79] pose les fondements d'une nouvelle approche écologique de la perception qu'il redéfinit comme un système actif et non plus uniquement passif. Gibson introduit le concept des affordances comme une mesure de la possibilité d'exécuter des actions en fonction du répertoire sensori-moteur. Il établit que la perception

visuelle n'est pas uniquement un traitement passif de l'information lumineuse mais un véritable processus d'interaction mutuelle entre l'environnement et le système nerveux central. Ainsi quand nous percevons un objet, nous conceptualisons immédiatement les possibilités des actions que nous pouvons y appliquer à partir de ses propriétés physiques. Comme le précise Berthoz, *la perception visuelle ne doit donc pas être envisagée comme un simple mécanisme d'acquisition, mais plutôt comme une action simulée* [BER97].

Ware dans [WAR04] introduit un modèle psychologique du traitement de l'information par le système visuel humain. Ce modèle, très utile pour comprendre le processus dans sa globalité, est décomposé en trois étapes majeures. La première étape est dédiée au traitement parallèle de l'information pour extraire les caractéristiques basiques de l'environnement. La deuxième étape, concerne les processus de reconnaissance de formes et de segmentation de la scène visuelle en différentes régions de couleurs, textures et mouvements distincts. Enfin dans la troisième étape, l'information est intégrée pour produire quelques objets simples enregistrés dans la mémoire de travail à l'aide du support des mécanismes attentionnels. Nous allons maintenant décrire plus précisément l'ensemble de ces trois étapes.

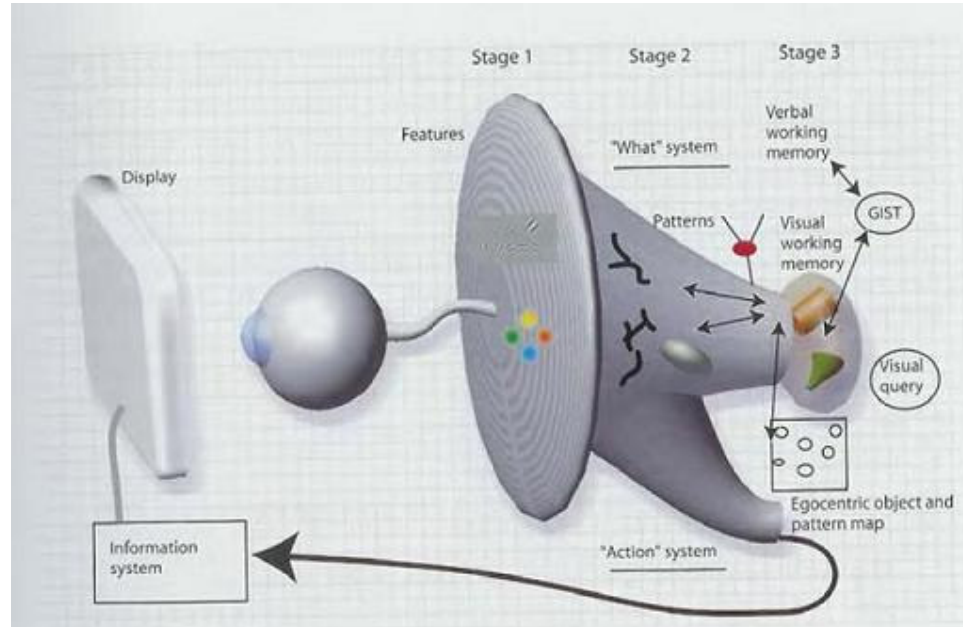


Fig. 2.3 Modèle des étapes de traitement de perception visuelle par Ware [WAR04].

2.1.2.2 Traitement parallèle pour l'extraction des propriétés basiques de la scène

L'information visuelle est dans un premier temps traitée en parallèle par une grande quantité de neurones situés dans l'œil et dans le cortex cérébral primaire. Des caractéristiques particulières de l'environnement sont extraites simultanément et traitées par des neurones spécialisés. Ce processus parallèle et rapide autorise une extraction de différents attributs de l'ensemble de la scène perçue. Cette étape de visualisation primaire ou pré-attentive est caractérisée par une extraction quasi immédiate des informations saillantes. Le temps nécessaire pour isoler ces attributs n'est pas dépendant du nombre de distracteurs présents dans la scène. Les attributs qui sont traités de manière pré-attentive sont :

- Les attributs de forme : orientation des lignes, longueur des lignes, épaisseur des lignes, colinéarité des lignes, taille, courbure, groupement perceptuel, tâche, signes, nombres.
- Les attributs de couleur : teinte, intensité.
- Les attributs de mouvement : direction, clignotement.
- La position spatiale : position 2D, profondeur, forme convexe/concave provenant de l'ombrage

2.1.2.3 Reconnaissance de formes

La seconde étape est fondée sur le regroupement des attributs dans les différentes régions définies selon leurs contours, textures, couleurs ou mouvements. Cette étape est influencée à la fois par des processus ascendants et descendants dirigés par l'attention. Un registre d'information sensoriel, la mémoire iconique, stocke sur un court laps de temps les formes perçues par le système visuel. Les fameuses lois de la Gestalt fournissent de bons indicateurs sur les mécanismes de regroupement sous jacents, qui conditionnent l'organisation perceptive de notre monde. On peut isoler huit lois fondamentales de la Gestalt [WAR04]:

- **Proximité** : Il s'agit d'un principe d'organisation spatial excessivement puissant basé sur le fait que les éléments proches se regroupent entre eux.
- **Similarité** : Des éléments de mêmes formes ont tendances à être regroupés ensemble lorsque la distance ne le permet pas.

- **Connectivité** : Les éléments liés entre eux ont la faculté d'apparaître comme appartenant à la même entité.
- **Continuité** : Ce principe indique notre tendance à construire des formes qui sont continues et linéaires plutôt que d'assimiler les formes pourvues de ruptures brutales.
- **Bonne forme** : le système perceptif privilégie dans le cas de conflits le regroupement de formes régulières, simples et symétriques.
- **Fermeture** : Une forme fermée est plus facilement reconnue comme une entité qu'une forme ayant des contours ouverts.
- **Destin commun** : des parties en mouvement ayant la même trajectoire sont perçues comme faisant partie de la même forme.

Comme le précise Kanizsa [KAN74], ces organisations perceptives peuvent agir dans le même sens en s'ajoutant et se renforçant mutuellement, ou bien par opposition.

2.1.2.4 Traitement séquentiel dirigé par les buts

Les objets manipulés durant cette étape, en nombre limité, sont localisés dans la mémoire de travail, plus spécifiquement dans le calepin visuospatial [BAD86]. Ils sont issus soit de la mémoire à long terme, soit de l'intégration des formes provenant des étapes précédentes du traitement visuel. Cette mémoire de travail est le siège d'activités cognitives complexes qui permettent le maintien temporaire et la manipulation de l'information visuelle. A la différence de la mémoire à court terme qui est un système de stockage passif, cette mémoire est dynamique. De plus, contrairement à la mémoire à long terme, ses capacités de stockage et sa durée de rétention sont limitées. Le traitement des objets est supervisé au moyen d'un administrateur central capable de contrôler et coordonner les processus attentionnels en fonction des buts à atteindre. Cette étape de traitement constitue l'étape la plus coûteuse en termes de ressources mnésiques et de temps de traitement.

2.1.3 La perception de la 3D

Nous évoluons quotidiennement dans un environnement tridimensionnel et pourtant les images qui se forment sur la rétine sont purement bidimensionnelles. Pour réaliser cette transformation, le système visuel s'appuie sur différents indices de profondeur pour extraire cette information 3D. Bowman et Al [BOW05] décrivent quatre grandes catégories

d'indices à la fois psychologiques et physiologiques : monoculaire, oculomoteur, parallaxe du mouvement, disparité binoculaire.

- Les indices monoculaires et statiques, provenant d'une image fixe, peuvent être extraits à l'aide d'un seul œil. Parmi ces indices on peut citer la taille relative des objets, les différentes perspectives (linéaire et aérienne), le gradient de texture, l'occlusion, les ombres et les lumières. Ces indices sont couramment utilisés en imagerie numérique pour produire une perception de la profondeur à partir d'un dispositif d'affichage 2D.
- Les indices oculomoteurs proviennent des tensions musculaires du système visuel engendrant des actions d'accommodation et de convergence/divergence. L'accommodation est induite par des contractions des muscles ciliaires qui augmentent ou diminuent la courbure du cristallin et fournissent une indication sur la distance de l'objet ciblé. La convergence et la divergence sont des rotations des yeux fonction de la distance de l'objet.
- La parallaxe du mouvement est un phénomène produit par le déplacement d'un objet par rapport aux points de vue de l'observateur. La règle est que les objets les plus proches se déplacent plus rapidement que ceux plus éloignés.
- La disparité binoculaire provient de la différence existante entre les images perçues par nos deux yeux. Les images provenant de chaque œil sont décalées spatialement. Certains neurones sont sélectifs à la disparité de chacun de ces éléments. La fusion de ces deux images produit une seule image stéréoscopique.

2.1.4 Mouvement

L'importance de détecter le déplacement d'un quelconque objet a conduit l'espèce humaine à développer au cours de l'évolution une grande sensibilité aux mouvements. Il s'agit d'un des attributs dont l'extraction est réalisée par le système visuel lors de traitements précoces. Au niveau de l'aire V1, on retrouve déjà des neurones sensibles à la direction du mouvement. Au niveau des voies visuelles, le mouvement est traité par la voie dorsale jusque dans les aires Médio-Temporale (MT) et Médio-Temporale Striée (MST). L'aire MT est

impliquée dans la différenciation et l'intégration spatiale des mouvements complexes. L'aire MST est le lieu de convergence de signaux sensoriels et de signaux externes signalant le mouvement de l'œil et de la tête. Ce traitement conditionne la faculté de poursuite de nos yeux [BER97].

L'affichage séquentiel d'un ensemble d'images à une vitesse suffisante permet au système visuel de créer l'illusion d'un mouvement continu [RAM86]. Pour établir ce mouvement apparent, le cerveau extrait et combine différents attributs pour produire un modèle global de mouvement (basse fréquence, texture spatiale...). Ce type de mouvement est utilisé en vidéo dans le cadre de l'animation d'images. Le cerveau a développé au cours de l'évolution un certain nombre de mécanismes pour éviter une comparaison points à points à chaque instant pour une même scène. A partir d'un groupement perceptuel de régions de même luminance ou de texture similaire, le cerveau va estimer la correspondance entre chaque image et créer l'illusion d'un mouvement continu. Lorsqu'une ambiguïté apparaît sur la direction du mouvement le cerveau se réfère à des axiomes basés sur les propriétés physiques du monde réel.

Un autre aspect de la perception du mouvement, provenant aussi de notre faculté héréditaire à associer le mouvement au concept de proie/prédateur, est son rôle d'attracteur attentionnel. A la manière d'autres attributs de la scène perçue, le mouvement induit un effet « pop out » [TRE80]. L'extrême sensibilité de nos bâtonnets, qui comme nous l'avons dit sont les seuls photorécepteurs présents en périphérie de la rétine explique pourquoi un objet en mouvement à l'extrémité du champ visuel va attirer notre attention. Une saccade oculaire pour le placer au centre de la fovéa sera automatiquement déclenchée afin d'identifier de manière plus précise la nature de cet objet.

2.1.5 Contours virtuels

Un contour est par définition une limite perceptuelle continue entre deux régions de l'espace. La ligne de démarcation engendrée par le contour peut être induite par des régions caractérisées par des différences de couleur, de profondeur, de mouvement ou de texture. Les contours virtuels ou subjectifs ont été largement employés pour étudier les mécanismes de perception inconsciente d'extraction de contours. Kanizsa dans [KAN95] proposa au travers de ses figures, aujourd'hui devenues emblématiques dans l'étude des illusions visuelles, une

étude psychologique de ce phénomène. Comme le montre la figure 2.4 à gauche, la région située au centre semble être plus lumineuse que le fond de la page. En outre un carré paraît s'interposer devant les quatre figures des cercles auxquels il manque une portion. Pour des conditions de stimulation identiques se produit donc une transformation de luminosité sur une région qui subit un déplacement phénoménal pour apparaître au premier plan. Ce phénomène de contour virtuel a un caractère quasi immédiat à partir de zones qui ne présentent pourtant pas de discontinuités de luminance

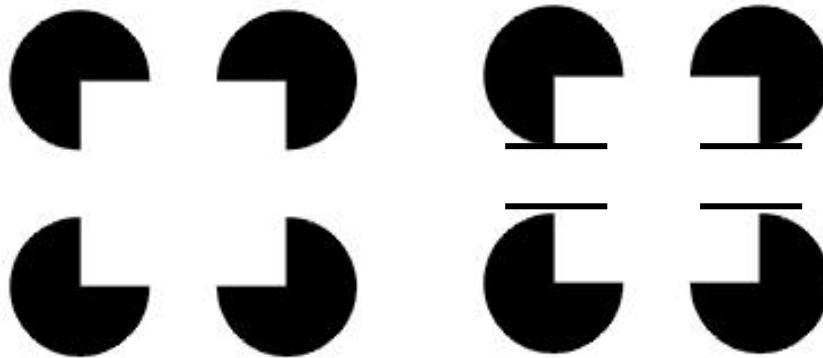


Fig. 2.4 Figure Kanizsa à gauche un carré plus lumineux semble émerger, à droite les segments brisent la perception des contours virtuels.

Roulin [ROU98] propose trois raisons principales à l'émergence de ce phénomène. Premièrement, les cellules ganglionnaires comme la majorité des neurones du cortex cérébral reposent sur un principe de centres ON/OFF. Un principe d'inhibition latéral aux niveaux des entités neuronales est associé à un mécanisme plus global de contraste simultané entre les régions sombres et claires. Deuxièmement, un mécanisme de colinéarité génère une facilitation dans une direction congruente à tout contour supraliminaire. Ce principe est observable au travers d'un abaissement des seuils d'extraction induit par les bords droits d'un contour. Troisièmement, un mécanisme de liage des terminaisons intervient au niveau de neurones dit hypercomplexes sensibles à la terminaison de lignes présentes dans leur champ récepteur. Les deux mécanismes de contours évoqués vont donc permettre un groupement d'information entre des neurones séparés. Cette information de contour est ensuite associée à la luminosité à l'aide du mécanisme de fermeture évoqué précédemment dans les lois de la Gestalt. Ce principe de fermeture intervient au niveau de l'étape intermédiaire du modèle de Ware. Ce traitement prend pour cette raison uniquement quelques centaines de millisecondes tout au plus et ne mobilise pas de processus attentionnels.

2.1.6 Imagerie mentale et carte cognitive

L'imagerie mentale est une représentation interne de stimuli physiquement absents dont le siège est localisé dans la mémoire de travail. Elle constitue un domaine de recherche extrêmement controversé en psychologie auquel ont pu prendre part de nombreux chercheurs célèbres tels que Piaget [PIA66] ou Kosslyn [KOS78]. A l'heure actuelle le modèle qui prévaut soutient que l'information décrivant une image mentale visuelle est codée sous une forme analogique, c'est-à-dire semblable à l'objet physique correspondant [MAT98]. Les difficultés rencontrées dans ce domaine d'études sont liées au caractère introspectif du phénomène. C'est Shepard et Metzler [SHE71], dans les années soixante dix qui introduisent les premiers un cadre d'étude formel pour l'imagerie mentale. Ces travaux ont permis de démontrer que les opérations mentales de rotation d'un objet nécessitent un temps proportionnel à cette même action dans le monde réel. Une rotation mentale de 60 ° prend deux fois plus de temps qu'une rotation de 30°. C'est l'angle de rotation de la forme « pensée » qui conditionne donc la durée de cette tâche. Kosslyn et Al [KOS78] a montré que la durée nécessaire pour rejoindre deux points situés sur une carte mentale est dépendante de la distance entre ces points. Plus la distance est grande et plus cette durée est importante. Une carte mentale est un dispositif qui permet de coder l'aménagement de notre environnement spatial. Les informations qui constituent une carte mentale peuvent être procédurales ou liées à une connaissance des points de repères. Les distances et les formes peuvent être déformées selon des heuristiques d'alignement et de rotation de la réalité. Ces cartes mentales sont stockées dans la mémoire à long terme et manipulées dans la mémoire de travail.

2.2 Perception visuelle des données sismiques

La description physiologique et psychologique du traitement visuel et de certaines fonctionnalités abordées, nous a permis de définir un ensemble de concepts qu'il est maintenant utile de replacer dans le cadre particulier de nos recherches. Une analyse de la modalité visuelle est ainsi proposée pour la détection de failles et la composition du modèle structural.

2.2.1 Caractéristiques perceptuelles des failles

D'un point de vue géologique, une faille est une rupture qui divise le volume rocheux et engendre un décalage de diverses couches géologiques. La facilité d'analyse de la donnée dépend de la structuration des horizons, de la qualité de l'acquisition sismique et du mode de visualisation adopté. Ces discontinuités sont observables de manière optimale sur les coupes sismiques qui intersectent le plan de la faille selon un angle proche de 90°. Une faille est d'après nous, d'un point de vue des mécanismes de perception visuelle, une forme qui n'a pas d'existence propre mais qui émerge plutôt d'une réalité phénoménale induite par les horizons qui l'entourent. Il est envisageable de proposer un scénario sur les mécanismes perceptuels qui interviennent dans la localisation de cette structure particulière en rapport avec les mécanismes de contours virtuels évoqués précédemment. Deux autres points de vue concernant les caractéristiques visuelles des failles sont présentés dans [BEC06] et [BER06].

Les couches sédimentaires contiguës (dont l'aspect dépend des matériaux géologiques qui les composent) vont engendrer une réponse des cellules consacrées au traitement du contraste qui sera proportionnelle à la différence des intensités de luminance. La rupture de la continuité des horizons le long du plan de faille va provoquer une détection des terminaisons par les neurones hypercomplexes au niveau du cortex visuel V1. Et comme dans le cas des images synthétiques à contours virtuels, ces différentes terminaisons vont être intégrées à l'aide du principe de fermeture pour produire une perception continue de la forme de la faille. Ce traitement est réalisé au niveau pré-attentif, pour cette raison, il s'avère relativement rapide. Au même titre qu'un expert, n'importe quel individu novice est capable de détecter les failles délimitées par des horizons à fort contraste (Zone A de la figure 2.5).

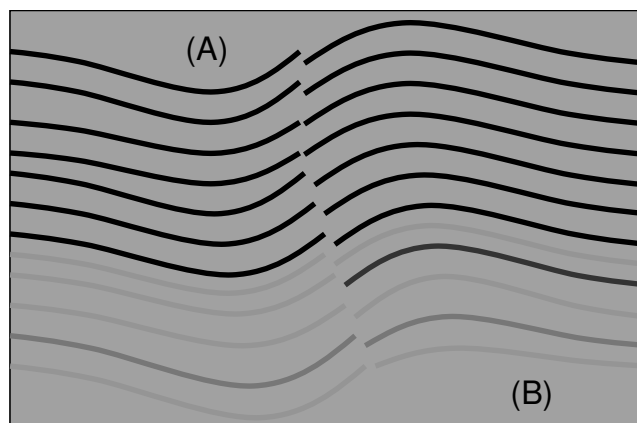


Fig. 2.5 Terminaisons de lignes fortement et faiblement contrastées.

En revanche dans des zones sourdes où les horizons sont bien moins marqués (zone B sur la figure 2.5), un individu novice est généralement incapable de localiser une faille. En se basant sur ses connaissances géologiques, un expert va rechercher des informations locales signalant la présence de failles pour ensuite extrapoler la forme globale. Ces connaissances de la géologie structurale, vont mettre l'expert en face de différentes alternatives à partir desquelles une décision devra être prise. Ce processus requiert la mise en place d'une recherche visuelle guidée par l'attention et du rappel d'informations situées en mémoire à long terme. Nous formulons donc l'hypothèse selon laquelle la perception de certaines failles dans les zones peu bruitées relève de mécanismes pré-attentifs relativement rapides et peu coûteux en terme de ressources mnésiques (étape 2 du modèle de Ware). Dans les zones sourdes à faible contraste ce sont les connaissances qui dirigent la recherche visuelle d'indices perceptuels (étape 3 du modèle de Ware). Ce processus descendant est beaucoup plus lent et nécessite de nombreuses années d'expériences.

Afin d'améliorer la localisation des failles en imagerie sismique dans les zones bruitées et non bruitées, il est envisageable d'animer les sections à la manière d'une séquence vidéo. Trois raisons principales soulignent l'intérêt que nous portons pour l'animation dans le cadre de ce processus d'extraction visuel.

- Le mouvement des horizons et de leurs terminaisons va constituer un attribut visuel supplémentaire qui sera traité en parallèle par le système visuel. Sans alourdir le traitement de l'information à un niveau préattentif, la détection des contours de la faille sera facilitée. Nous pensons que l'animation va permettre le traitement pré-attentif de certaines failles qui seraient normalement traitées en statique par des processus descendants.
- Le mouvement des couches et éventuellement de la faille (si la direction de l'animation n'est pas strictement congruente au plan de faille) va avoir un effet pop-out qui peut accélérer la recherche visuelle et faciliter la ségrégation du contour par rapport aux distracteurs présents.
- L'animation est reconnue pour certain type de données (en radiologie par exemple : radio-cinéma) pour faciliter une meilleure perception de la profondeur. Ainsi, la

conceptualisation de la géométrie 3D des failles doit pouvoir être facilitée au travers d'une visualisation 2D + temps.

2.2.2 Représentation mentale des structures et du modèle structural

La donnée sismique contient de multiples structures géologiques, dont l'agencement peut paraître chaotique pour le néophyte, mais qui respecte des principes bien établis pour l'expert. Même si cette portion du sous-sol fait l'objet d'une analyse indirecte au travers d'images numériques, le but de l'interpréteur est d'en établir une cartographie aussi pertinente et précise que possible. En se basant sur l'analyse de diverses sections sismiques, il reconstruit mentalement certaines structures 3D telles que les failles avant de les modéliser numériquement. Cette représentation est centrée à la fois sur les caractéristiques géométriques de l'élément étudié et sur sa localisation dans l'environnement.

La tâche d'exploration, présentée dans le chapitre premier, est donc nécessaire pour estimer la forme des failles et comment elle peut s'intégrer dans le schéma structural. A la manière de l'exploration d'un environnement urbain, le géologue va repérer les horizons les plus pregnants et les failles, comme un observateur le ferait avec les routes et les bâtiments saillants. Cette exploration est réalisée en manipulant les différentes sections sismiques dont l'opacité empêche une perception 3D du phénomène. Ainsi la connaissance de l'orientation et de la position de chaque section affichée est essentielle afin de replacer l'information extraite dans son contexte global.

L'efficacité de ce processus de compréhension spatial, qui conditionne la pertinence des connaissances acquises, est liée aux capacités spatiales de chaque interpréteur. Ces capacités spatiales font référence à la capacité de produire, représenter, transformer et rappeler des informations spatiales.

La représentation mentale du modèle d'une faille est donc particulièrement problématique à mettre en place à partir d'une simple vue planaire. En effet, même si les sections affichées sont associées à des coordonnées précises, ce sont les interpréteurs qui doivent mentalement effectuer un certain nombre de rotations mentales pour aligner et intégrer ces informations. Ce processus cognitif que Tory [TOR03] dénomme l'enregistrement mental (mental registration) est une transformation mentale dans laquelle plusieurs vues d'une même donnée sont alignées

spatialement pour former la représentation finale d'un objet. Les rotations mentales, comme nous l'avons déjà mentionné, ont une durée dépendante de l'angle de rotation.

Avant d'obtenir une modélisation numérique à partir du nuage de points issu du pointé, l'expert va devoir s'appuyer sur la qualité de sa représentation mentale. Or, comme nous avons pu le voir, le cerveau a tendance à déformer ce type de représentation topographique. De plus les représentations mentales sont dépendantes d'une orientation préférentielle découlant de la manière dont les connaissances enregistrées dans la mémoire à long terme ont pu être acquises. Pour cette raison comme nous allons maintenant le voir, de la même manière que l'animation améliore la localisation des failles, la visualisation animée des sections intégrées au sein d'une vue 3D facilite l'établissement du schéma structural.

2.3 Proposition de nouvelles techniques de visualisation

Les différents mécanismes développés par notre système visuel et mis en jeu dans la localisation des failles à partir d'une donnée sismique a pu être illustré. A la différence des autres structures, le caractère subjectif des failles rend leur extraction particulièrement problématique. De plus, la méthode de visualisation par coupes dans un environnement graphique 2D engendre une multiplicité des opérations mentales pour replacer ce que voit l'expert par rapport à la réalité terrain. La mise en place du modèle mental de la faille n'est pas aisée en raison du caractère opaque de la donnée, qui oblige l'expert à associer les différentes représentations d'un même objet. Une technique de visualisation basée sur l'utilisation d'un environnement graphique tridimensionnel intégrant la visualisation des coupes 2D doit permettre de solutionner une partie de ces problèmes. Nous proposons maintenant trois solutions innovantes découlant de ce concept.

- La première technique de visualisation, dénommée **coupe adaptive** est basée sur un rendu par texture volumique qui permet l'affichage de n'importe quelle section oblique dans une vue 3D en fonction d'un vecteur de l'espace.
- La deuxième technique, la **coupe projective** est un prolongement de la technique précédente capable de fournir une information multi contexte offrant une vue originale de la donnée qui facilite l'anticipation durant l'animation des sections.

- Enfin, des **cartes d'orientation** facilitant le lien entre l'orientation et la position des sections par rapport au contexte défini par le volume sismique, seront présentées.

2.3.1 Méthode de rendu des données sismiques

La méthode de rendu des sections sismiques dans l'environnement 3D doit répondre à différents objectifs : une animation fluide, une visualisation en temps réel de n'importe quelle section, une adaptabilité de la résolution des images sismiques en fonction de la mémoire occupée par la donnée. L'approche proposée se distingue des méthodes de rendu de données 3D basées sur l'extraction de voxels par *isosurfaces* ou *Direct Volume Rendering*(DVR). Les méthodes de DVR consistent à utiliser des fonctions de transfert qui déterminent la contribution de chaque voxel à l'image finale [CAS05]. Outre la difficulté d'établir des critères mathématiques capables d'isoler des structures aussi complexes que les failles, notre priorité est de préserver l'intégrité de la donnée. Pour cette raison, les sections sismiques seront visualisées dans une interface 3D en utilisant une méthode de rendu par **texture volumique** introduite par Kajiya et Al [KAJ89]. Nous ne décrirons pas précisément les principes informatiques sous-jacents à la texture volumique qui sortent du cadre de notre étude. Certains logiciels commerciaux, tel que Volume Viz LDM² sous Open Inventor (surcouche de OpenGL) propose des fonctions qui implémentent directement ce mode de rendu. Marc Donias du LASIS a développé, dans l'outil N'D³, une vue 3D sous DirectX capable d'afficher des données volumiques à partir de ce mode de rendu.

Néanmoins, il est utile de préciser que ce principe s'appuie sur l'évolution récente des cartes vidéo 3D afin de traiter les coupes 2D d'une donnée texturée de manière interactive avec une vitesse d'affichage élevée et constante. L'avantage principal de la texture volumique est que la majeure partie du calcul nécessaire, peut être traité directement par la carte vidéo en temps réel. La géométrie de la surface et la texture sont transférées dans la carte graphique qui génère le rendu de manière autonome. Afin de tenir compte de la limite mémoire des cartes vidéo, seules les briques qui intersectent la surface visualisée sont à assigner (figure 2.6). Le choix de la taille de ces briques est un compromis à adopter entre la mémoire utilisée et la vitesse d'affichage prévue.

² <http://www.tgs.com/>

³ N'D : <http://perso.orange.fr/m.donias/>

Par exemple, une brique de $64 * 64 * 64$ voxels en mode de RGBA (canal de trois couleurs plus un canal d'alpha) aura une taille d'environ 1 Mo. Une carte vidéo avec une mémoire de 512 Mo qui utilise 400 Mo pour la texture peut manipuler une matrice de $20*20$ briques et afficher une image haute résolution de taille $1280 * 1280$. En choisissant les briques de taille 32 pixels (deux fois moins grande), la carte peut afficher une image plus grande ($1600 * 1600$ pixel). En contrepartie un plus grand nombre de briques seront à charger ou à décharger dans la mémoire graphique à chaque changement de section.

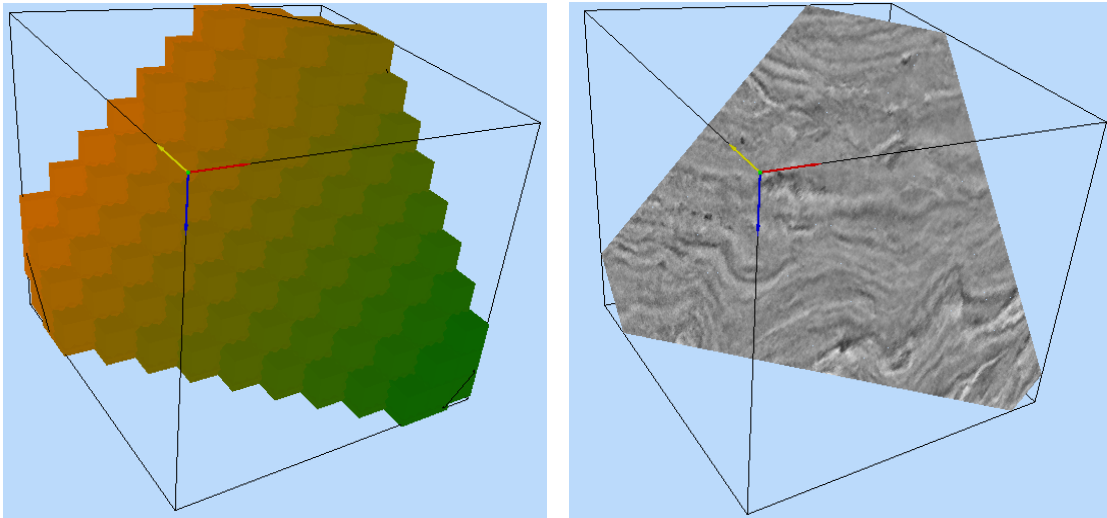


Fig. 2.6 Une section rendue à l'aide de la texture volumique.

2.3.2 Coupe adaptative

Les vues 2D et 3D sont utilisées communément dans différentes tâches de visualisation pour l'étude de données scientifiques 3D. Chacune de ces vues possède des caractéristiques spécifiques qui les destinent à la réalisation de certains types de tâche : la vue 2D est dédiée à l'étude de détails précis et au positionnement relatif alors que une vue 3D facilite la compréhension globale des formes et le transfert d'information entre différents protagonistes [TOR03][TOR06][STJ01]. Les limites des vues 2D découlent de la nécessité pour l'interpréteur de réaliser de nombreuses rotations mentales afin d'aligner et d'intégrer les informations extraites des différentes vues. Certaines stratégies de visualisation associant 2D et 3D au sein d'une unique vue limitent ce problème. Tory [TOR03] identifie différentes méthodes mixant ces deux types de vues :

- *Clipping Plane* : la coupe affichée est présentée à sa position originelle par rapport au contexte 3D (figure 2.7 - a). Cette méthode ne demande pas à l'utilisateur d'effectuer des rotations mentales pour aligner les informations selon la bonne orientation. En revanche toutes les coupes situées entre le point de vue de la scène et le plan de clipping sont supprimées. Une alternative à cette méthode qui compense en partie cette perte d'information est le *cutting plane* (figure 2.7 - b) qui conserve la donnée située en amont du plan. A la manière d'un livre ouvert, une partie de la donnée est déplacée mais reste visible pour l'observateur.
- *Orientation icons* : les vues 2D et 3D sont affichées l'une à côté de l'autre (figure 2.7 - c). Le contexte global et les détails sont donc présents simultanément. La vue 3D oriente les utilisateurs afin d'établir la correspondance entre les différentes informations extraites de la vue 2D. Cette méthode est principalement rencontrée en imagerie biomédicale.
- *ExoVis* : la vue 3D est disposée au centre de la zone d'affichage pour présenter le contexte global (figure 2.7 - d). Des vues 2D situées autour du volume de données sont affichées selon leur orientation originelle. Ces vues peuvent être déplacées mais leurs orientations restent congruentes à celle de la vue 3D.

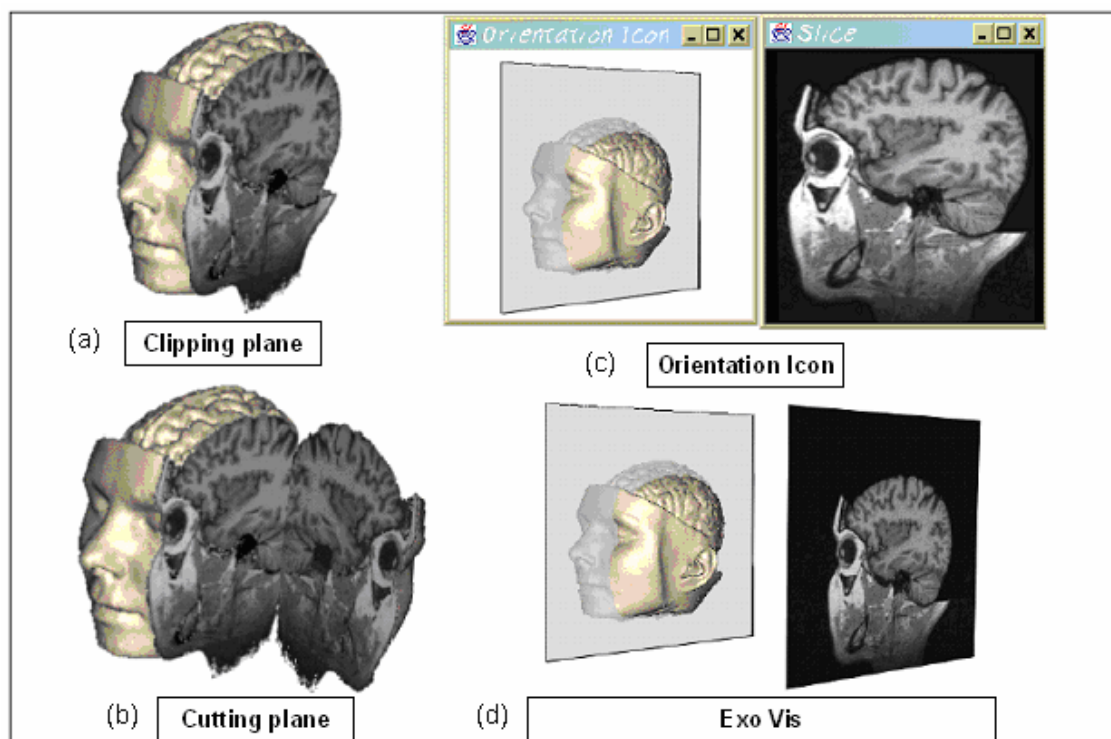


Fig. 2.7 Méthodes de visualisation mixtes (2D/3D) selon Tory [TOR03].

Tory et Al dans [TOR06] ont comparé ces méthodes pour aboutir à la conclusion que l'enregistrement mental est plus aisé avec le plan de clipping qu'avec l'orientation icon ou l'exovis. Pour cette raison, il semble pertinent de visualiser les sections sismiques au sein d'une vue 3D à l'aide d'un principe similaire à celui proposé par le plan de clipping. En nous basant sur la technique de texture volumique, nous avons adopté une solution qui permet d'afficher en temps réel n'importe quelles sections obliques ou canoniques d'un volume sismique au sein d'une boîte englobante symbolisant les limites du bloc. A la différence des vues 2D traditionnelles, la section est affichée dans la vue 3D conjointement à la boîte englobante. L'utilisateur n'a donc pas besoin d'effectuer de rotations mentales pour replacer la position et l'orientation d'une section dans le volume, ce qui réduit la charge mnésique par rapport à une visualisation planaire. La coupe 2D est visualisée telle quelle (« in situ ») dans la donnée. Cette technique facilite le positionnement et l'orientation tout en préservant l'intégrité de la donnée. Nous utilisons le terme de **coupe adaptative** pour décrire cette méthode car elle autorise un changement en temps réel de la section affichée par rapport à n'importe quel vecteur de l'espace. Nous reviendrons dans le chapitre trois sur les moyens de manipuler ces coupes adaptatives dans le cadre des différentes tâches de la détection supervisée.

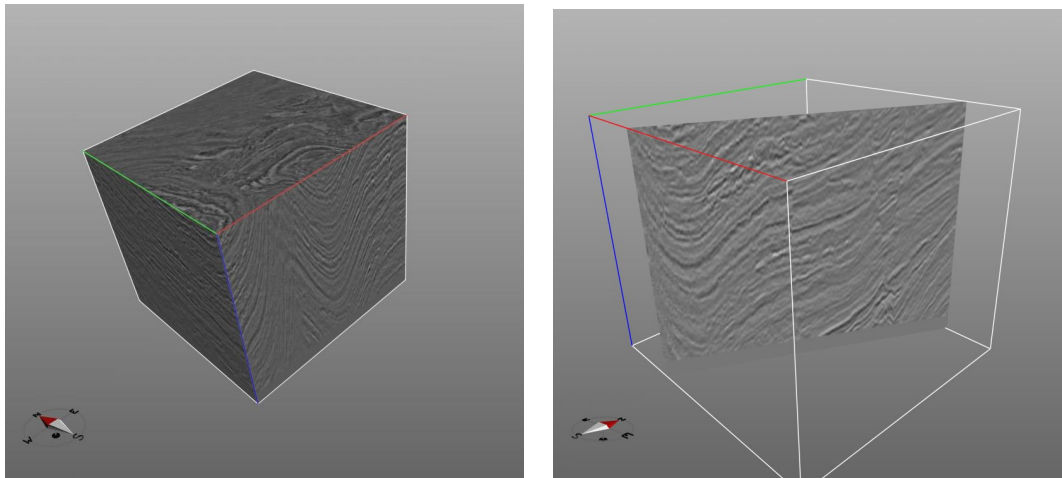


Fig. 2.8 Volume sismique et une coupe adaptative présentant une section oblique.

2.3.3 Coupe projective

L'animation des sections combinée à une sélection à la volée des points d'acquisition est la base de la technique de pointé dynamique qui sera présentée en détail dans la chapitre suivant. La bonne réalisation de la segmentation manuelle à l'aide de cette technique est en partie liée aux capacités motrices des utilisateurs, elles-mêmes conditionnées par le périphérique d'entrée et la fonction de transfert associée entre le déplacement du périphérique et du curseur. Un autre paramètre à prendre en compte réside dans le caractère dynamique de l'environnement visualisé qui contraint l'utilisateur à maîtriser continûment la position du curseur en fonction des évolutions de sa cible. La difficulté pour l'utilisateur est que cette tâche s'effectue en boucle fermée en imposant un traitement constant du flux d'information en entrée. En raison du compromis temps/précision adopté et de la vitesse de défilement, il apparaît parfois difficile d'anticiper les déformations géométriques de la structure à segmenter. L'opacité de sections sismiques empêche la prise en compte d'indices de profondeur utiles à ce processus d'anticipation.

Wickens et Hollands [WIC99] ont proposé un modèle pour décrire ce type de tâches fermées rencontrées dans de nombreuses activités humaines (figure 2.9). Dans notre étude l'interpréteur (opérateur humain) agit sur l'interface d'imagerie 3D (système) au moyen d'un périphérique de pointé (contrôle) et détermine sa cible sur chaque coupe successivement présentée (commande d'entrée). La fonction d'entrée $ic(t)$ correspond aux différentes sections

affichées à un instant t . Au travers de l'interface graphique, l'opérateur va localiser sa cible (la faille) et la position du curseur pour estimer une fonction d'erreur $e(t)$. En fonction de cette erreur calculée, il applique une force $f(t)$ sur le périphérique pour corriger éventuellement ce biais. La fonction de transfert $u(t)$ va transformer le mouvement physique du périphérique en mouvement du curseur. La position du curseur sera modifiée et la boucle réamorcée. Ce processus sera itéré jusqu'à l'obtention d'un nuage de points suffisamment dense.

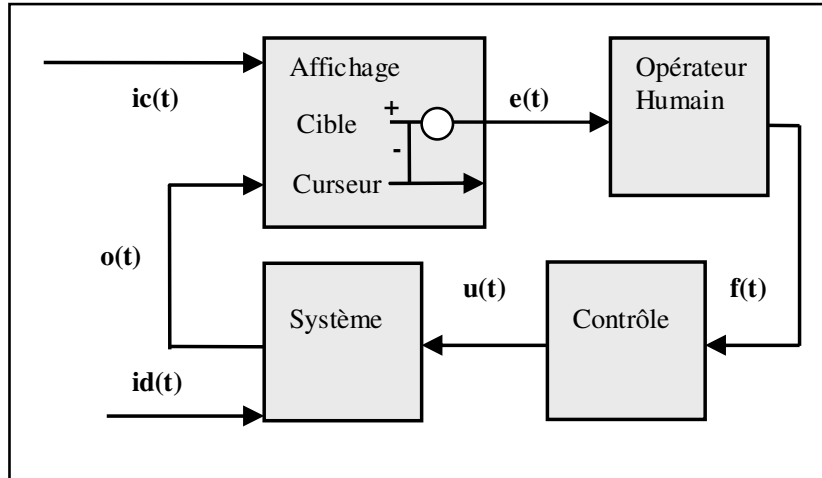


Fig. 2.9 Tâche en boucle fermée selon Wickens [WIC99].

Pour anticiper une erreur future, l'opérateur doit mener une évaluation mentale basée à la fois sur une estimation de la position du curseur (prédiction) et sur la localisation de la cible future (prévisualisation). La prédiction est une fonction cognitive proactive utilisant la trajectoire passée et la connaissance inhérente des comportements du système. Dans notre tâche de segmentation manuelle, la faculté de prédiction est conditionnée par l'ordre de la fonction de transfert qui associe les mouvements du périphérique au déplacement du curseur. La prévisualisation consiste à déterminer où se situera la cible à partir d'une visualisation de l'environnement futur. La nature opaque des données sismiques empêche une prise en compte de cette information future. Les changements de la cible peuvent donc influencer sur la bonne mise en oeuvre du pointé. L'hypothèse que nous formulons est que la sélection des points durant l'animation est rendue plus complexe en raison de l'impossibilité d'anticiper les variations géométrique de la structure à interpréter.

Afin de résoudre ce problème, une nouvelle technique de visualisation multicontexte appelée **coupe projective** est proposée. L'idée des méthodes de visualisation qui présentent

différents contextes n'est pas nouvelle, particulièrement dans le domaine de la visualisation d'information. Le *fish-eye* [FUR86], est une déformation de la vue liée à une fonction de grossissement généralement non linéaire centrée sur une zone particulière. Cette méthode permet une analyse plus fine des détails d'une partie de la vue tout en préservant le contexte alentour déformé selon une transition continue. Gutwin et al [GUT03] a expérimentalement démontré que ce type de déformation, lorsqu'elle est indexée sur la position du curseur, peut être particulièrement efficace dans le cadre de tâches de sélection trajectorielles. Le *perspective wall* de Mackinlay et al [MAC91] est une autre technique de déformation dont l'idée principale est de présenter une information 2D en perspective dans une vue 3D. La zone centrale planaire contient les informations à analyser alors que deux régions en perspective présentent le contexte global. Cette méthode est une manière d'afficher un nombre d'informations plus important dans une seule vue.

L'idée qui sous-tend la coupe projective est de combiner des parties du contexte présent et du contexte futur en se plaçant dans le cadre d'une donnée animée (figure 2.10). Sur un plan informatique, son implémentation est axée sur l'utilisation de la texture volumique introduite précédemment. Le principe est de préserver une partie des informations de la section affichée tout en y associant deux sections obliques présentant un futur « progressif ». Le contexte présent est donc une portion, de la coupe visualisée à l'instant t , automatiquement centrée sur la position courante du curseur. Deux coupes inclinées avec un angle variable, entourant le contexte présent, proposent une combinaison d'informations extraites de la donnée en aval de la section courante. Un effet de perspective est ajouté aux coupes inclinées afin de fournir une indication sur la valeur de l'angle entre le futur et le présent. Plus cet angle est élevé et plus les coupes inclinées concernent un futur lointain.

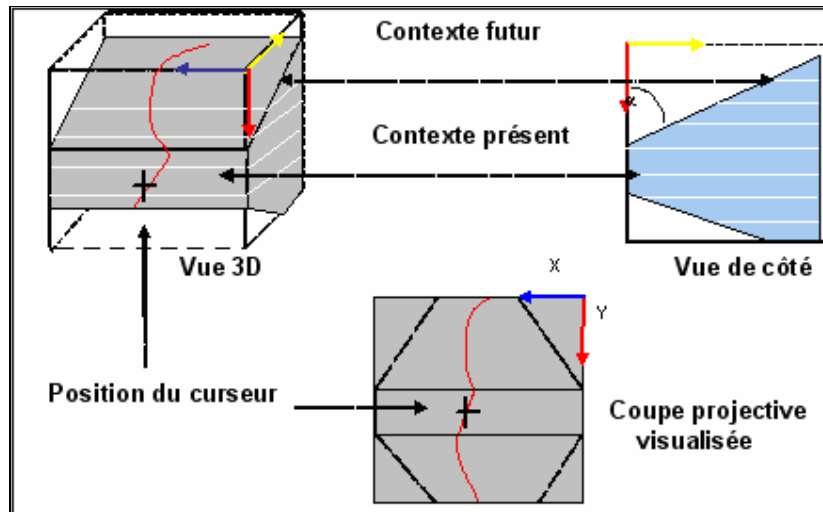


Fig. 2.10 Principe de la coupe projective un outil multicontexte de pré-visualisation.

L'image obtenue véhicule donc une information multicontextuelle qui respecte l'intégrité de la donnée tout en facilitant l'anticipation. De plus, elle fournit un indice de profondeur qui va permettre une prise en compte plus globale des structures étudiées (figure 2.11). Dans le chapitre quatre, une expérience destinée à illustrer l'avantage de cet outil dans le cadre d'un pointé dynamique sera présentée. La possibilité d'inverser l'angle entre les deux contextes a aussi été envisagé afin de combiner présent et passé pour renseigner l'utilisateur sur les informations déjà pu traitées.

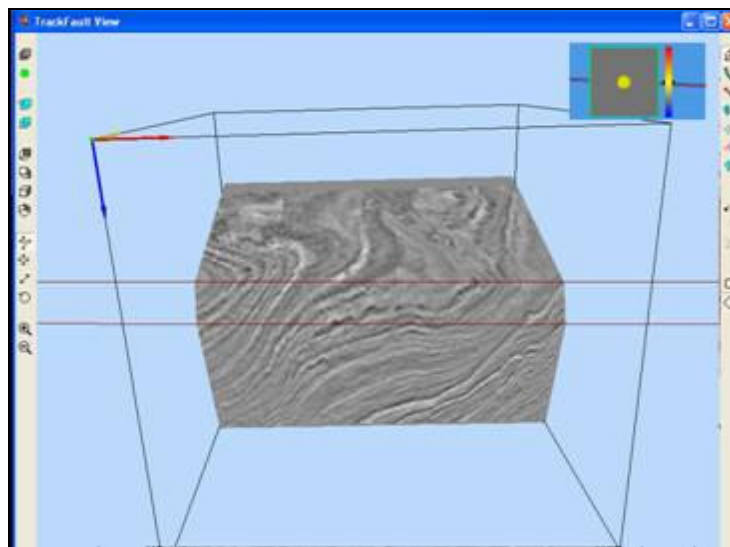


Fig. 2.11 La coupe projective dans la vue 3D de N'D.

2.3.4 Cartes d'orientation 3D

La localisation d'une section dans le volume est facilitée par sa représentation à l'intérieur de la boîte englobante qui figure les limites de cette donnée. Néanmoins en fonction du point de vue de la caméra, cette localisation n'est pas toujours évidente. En effet il se peut que l'utilisateur souhaite agrandir une portion de la section pour analyser un élément particulier. La boîte englobante ne sera alors plus visible, ce qui entraînera nécessairement les mêmes problèmes de désorientation que ceux rencontrés dans une vue 2D. Une manière de résoudre ce problème est d'utiliser des indicateurs externes tels que des **cartes**. La conception des cartes dans un environnement 3D doit respecter un certains nombres de principes [BOW05]. Premièrement, l'utilisation d'un marqueur YAH⁴ est fortement recommandée. Ce marqueur, dans notre problématique figure la position de la section visualisée sur la carte. De plus, il est nécessaire de choisir parmi les catégories de carte existante, celle qui est la mieux adaptée au système de référence. Un système de référence correspond à la position du point de vue de l'utilisateur dans l'environnement virtuel. Il existe deux sortes de référentiel : égocentrique et exocentrique. Un système de référence égocentrique définit un point de vue à la première personne à l'intérieur de l'environnement. Au contraire un système de référence exocentrique caractérise un point de vue à la troisième personne à l'extérieur de l'environnement. Darken et al ont proposé une catégorisation des cartes en deux groupes distincts [DAR99]:

- *North up* : ces cartes sont fixes et orientées par usage selon une direction qui correspond au nord géographique.
- *Forward up* : ces cartes s'adaptent à l'environnement perçu. Pour un utilisateur placé au sein de l'environnement cette orientation est congruente à la direction de son regard.

Darken, dans une comparaison des deux catégories de cartes conclus que les cartes north-up engendrent les meilleures performances pour un point de vue exocentré. Au contraire ce sont les cartes forward-up qui conviennent le mieux lors de l'utilisation d'un point de vue égocentré.

⁴ Un marqueur YAH (You Are Here = vous êtes ici) est un objet graphique largement utilisé dans les cartes pour figurer la position et l'orientation de l'utilisateur sur la carte.

Afin de faciliter la localisation de la section visualisée et la construction mentale des failles pour tous les scénarios envisageables, nous proposons trois cartes qui reprennent les principes que nous venons d'évoquer sous la forme de vignettes. Elles peuvent être incluses dans la partie supérieure de la zone d'affichage de la fenêtre de visualisation 3D (figure 2.12).

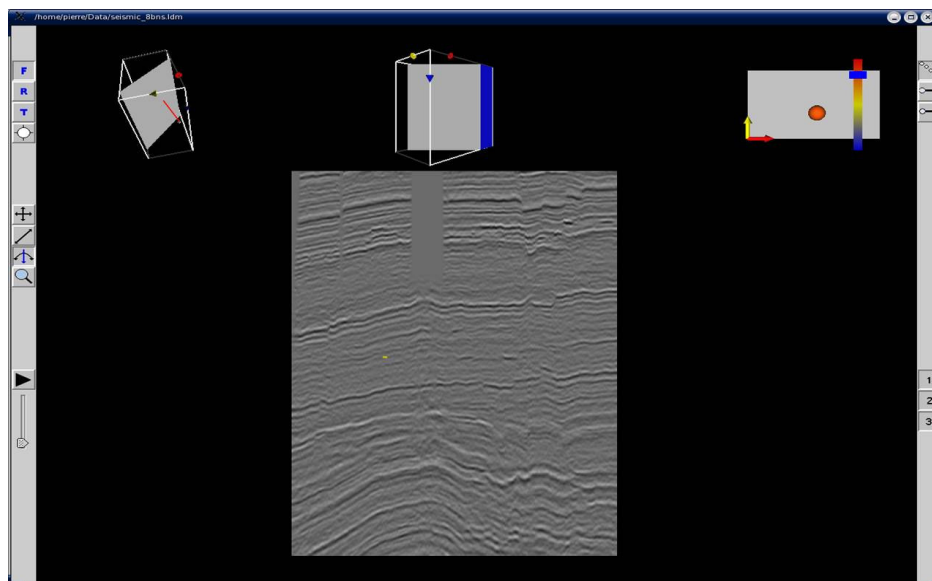


Fig. 2.12 Cartes d'orientation dans la vue 3D.

2.3.4.2 Carte time's up

La première vignette proposée, la carte time's up, présente une vue 2D du volume sismique figurant un point de vue time slice. Ce point de vue est donc congruent à l'axe des temps comme si l'utilisateur regardé le bloc «par dessus». Cette carte est constituée principalement par un rectangle dont la taille, proportionnelle aux dimensions (X, Y) du volume, est mise à l'échelle de la vignette. L'origine des coordonnées locales de la donnée est identifiée par des flèches qui respectent le code de couleur couramment employé par les géologues. Le point de focus au niveau duquel se situe la section affichée est symbolisé par une boule dont la position est mise à jour en temps réel. La couleur de la boule YAH change en fonction de la coordonnée Z de la section (profondeur). Une échelle de couleur dont la taille est indexée sur la dimension présente la palette de ces différentes couleurs. Un curseur situe la position selon la coordonnée Z de la section affichée. Un segment représentant la section dans le volume est visualisée lorsque que la section n'est pas strictement parallèle aux sections timeslices.

L'avantage de cette carte est de fournir une information rapide, à l'aide de code de couleurs spécifiques, sur les trois coordonnées dans la section affichée dans la vue principale.

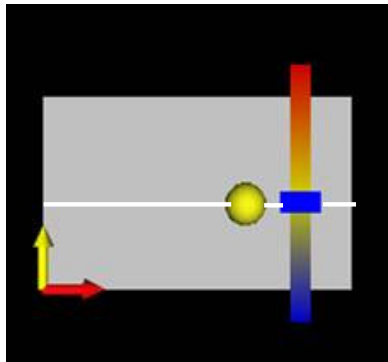


Fig. 2.13 La carte times-up.

2.3.4.3 Carte North-up

Cette carte 3D présente les limites du volume sous la forme d'une boîte englobante en fonction d'un point de vue défini par l'utilisateur. La caméra de cette vignette est donc complètement indépendante de la caméra de la vue principale. En déplaçant le curseur à l'intérieur de la vignette, l'utilisateur réalise des rotations sur le volume. La coupe visualisée dans la vue principale est symbolisée à l'intérieur de la carte par une surface non texturée. Différents objets comme le chemin définissant la trajectoire de l'animation ou les failles reconstruites peuvent y figurer. Ainsi l'interpréteur peut s'appuyer sur les informations fournies par cette carte pour affiner son expertise sans changer la section affichée dans la vue principale et s'orienter à partir des relations entre différents repères visuels.

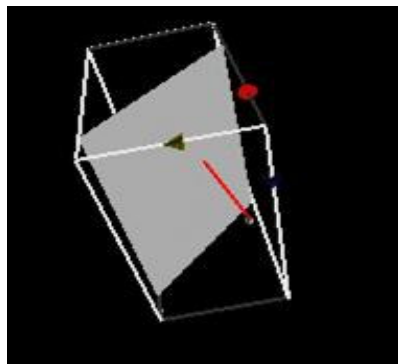


Fig. 2.14 Vignette NorthUp.

2.3.4.4 Carte forward-up

La carte forward-up reprend les mêmes principes que la carte précédente à la différence que l'ensemble des rotations et les translations (X, Y) de la caméra de cette vignette sont indexées sur la caméra de la vue principale. En revanche la translation Z est paramétrable interactivement par l'utilisateur en déplaçant le curseur du haut vers le bas pour s'approcher ou du bas vers le haut pour s'éloigner. Différents objets peuvent aussi y figurer sous une forme symbolique et fournir des indices perceptuels capable de faciliter la localisation de la section dans le volume.

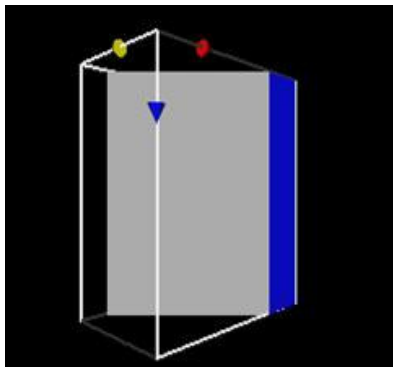


Fig. 2.15 Vignette ForwardUp.

Avec les différentes cartes que nous proposons, l'utilisateur a la possibilité de se concentrer sur l'analyse des détails des sections sismiques situées dans la vue principale sans se sentir désorienté. Chacune des tâches d'interaction que l'interpréteur réalise provoque en temps réel une mise à jour des vignettes et un feedback direct de l'implication de ses actions sur l'ensemble des vues. Nous pensons que ces cartes doivent permettre une externalisation de la cognition très utile pour réduire la charge mnésique dépensée dans l'accomplissement des tâches que nous étudions.

2.4 Synthèse

Ce chapitre a présenté les différentes étapes du traitement de la perception visuelle tant d'un point de vue physiologique que psychologique. Plus particulièrement nous nous sommes attachés à mettre en exergue les mécanismes liés à la 3D, aux mouvements, aux contours virtuels et à l'imagerie mentale. Un certain nombre d'hypothèses ont été fournies sur les modes de fonctionnement de ces mécanismes dans le contexte particulier de la localisation et

de la représentation mentale des failles sismiques. Ces hypothèses illustrent clairement la complexité de ce processus qui relève à la fois de traitements ascendants et descendants. Cette analyse nous a permis de créer et de proposer trois nouvelles catégories de techniques de visualisation. Premièrement, la coupe adaptative est une solution basée sur la méthode de rendu par texture volumique capable d'afficher en temps réel n'importe quelles sections obliques de la donnée sismique. Deuxièmement, la technique de coupe projective est une solution qui, au travers d'une information multicontexte, facilite l'anticipation des changements géométriques des structures incluses dans la donnée. Troisièmement, nous avons présenté trois cartes d'orientation représentées sous la forme de vignettes. Ces cartes sont destinées à accompagner l'interpréteur dans sa construction des failles. Le chapitre suivant est une continuité logique de ces travaux. Il a pour objet d'exposer un ensemble de techniques d'interaction dédiées au contrôle des outils de visualisation pour accompagner l'utilisateur dans le transfert des informations provenant de son modèle mental vers l'environnement numérique effectué durant la segmentation manuelle.

Chapitre 3

Nouvelles techniques d'interaction pour la détection supervisée

Le chapitre précédent a permis de mettre en exergue les atouts de la visualisation des sections sismiques au sein d'une vue 3D par opposition à la vue 2D traditionnelle. De nouveaux outils de visualisation capables d'affiner la localisation et la modélisation mentale des failles géologiques ont été proposés dans ce cadre spécifique. L'objectif de ce troisième chapitre est d'exposer un ensemble de solutions destinées à la fois au contrôle de ces nouveaux modes de visualisation mais aussi au transfert du modèle mental des failles vers l'environnement numérique.

D'après la théorie écologique de la perception de Gibson, la perception est indissociable de l'action. Selon lui, il faut agir pour percevoir et il faut percevoir pour agir [GIB79]. Le succès de ce couplage entre perception et action, évaluation et exécution a une incidence directe sur le bon accomplissement d'une tâche d'interaction. Pour cette raison les différentes techniques que nous allons exposer, dédiés au contrôle interactif de ces outils de visualisation dans le cadre de la détection supervisée, sont inspirées par le modèle de tâches décrit dans notre premier chapitre. Cette prise en compte du modèle conceptuel que les utilisateurs se font de leur tâche est un paramètre indispensable à l'acceptabilité de nos propositions. Ces solutions respectent la logique métier tout en offrant de nouvelles opportunités aux interpréteurs pour interagir avec le volume sismique.

Après une introduction concernant les styles d'interactions et l'interaction 3D, nous exposerons une nouvelle technique d'interaction dédiée à l'accomplissement de la tâche d'exploration (étape 2 de la figure 1.5) au moyen d'une visualisation par coupes adaptatives. Nous nous intéresserons ensuite à la tâche de segmentation manuelle (étape 3 de la figure 1.5) pour laquelle deux nouvelles techniques d'interactions seront proposées : les pointés dynamiques automatique et manuel. Ces techniques se fondent sur un défilement des sections orthogonales à un chemin prédéfini par l'utilisateur et sur la sélection continue de points d'acquisition le long de la faille ciblée. Les tâches de sélection misent en œuvre au travers de

ces deux techniques seront décrites et comparées au travers de la taxonomie d'Accot [ACC01]. Nous compléterons cette étude par une analyse des catégories de périphériques les mieux adaptés au contrôle des différents outils.

3.1 Techniques d'interactions et interaction WIMP

Une technique d'interaction est par définition une méthode qui permet à un utilisateur d'accomplir une action au travers d'une interface utilisateur [BOW05]. Une technique est associée aux composants logiciels contrôlant le transfert d'informations entre les périphériques d'entrée et les actions du système informatique ainsi que du transfert de la sortie du système informatique vers le périphérique de sortie (figure 3.1). Une technique d'interaction pour être efficace doit trouver son origine dans des métaphores afin que l'utilisateur crée un lien sémantique entre son action physique dans le monde réel et le résultat de celle-ci dans le monde numérique [TYN05]. Le succès du franchissement de la distance d'exécution et d'évaluation pour un utilisateur dépend donc de la pertinence de la technique proposée pour accomplir une action sur le système à partir du modèle conceptuel que l'utilisateur se fait de sa tâche.

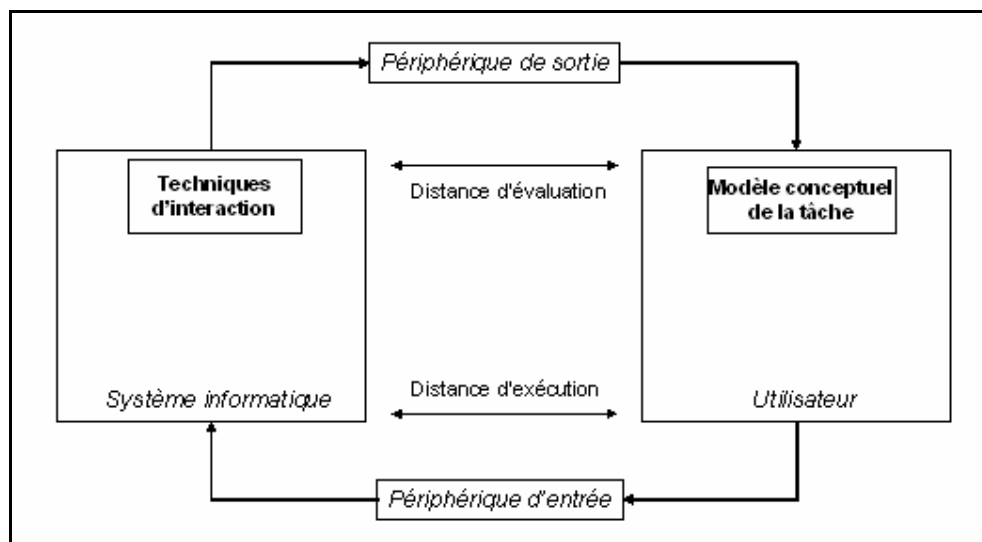


Fig. 3.1 Accomplissement d'une tâche à l'aide d'une technique d'interaction.

Depuis l'apparition des premiers systèmes d'exploitation jusqu'à nos jours, le paradigme WIMP (Windows, Icon, Menu, Pointing) qui se fonde sur le principe de manipulation directe [SHN98] reste une référence au niveau des styles d'interaction. Même si les interfaces en ligne de commandes ont toujours représenté une alternative au dialogue personne-machine, leurs fonctionnalités restent limitées et réservées à des utilisateurs experts plutôt que novices. Comme le précise Beaudouin-Lafon [BEA04], le principal problème des interfaces textuelles est que l'utilisateur doit assimiler le langage de commande et que les réponses du système sont difficiles à interpréter. Il en résulte pour ce type d'interface d'après la théorie de l'action, des distances d'exécution et d'évaluation élevées et parfois difficiles à franchir pour l'utilisateur. Une autre alternative à la manipulation directe est de déléguer certaines tâches répétitives à des agents logiciels. Cette automatisation, même si elle peut présenter une alternative intéressante pour décharger l'utilisateur de certaines tâches limite le contrôle, la compréhension et la prédictibilité du système [SHN97].

En 1963 Ivan Sutherland (figure 3.2 - à gauche), dans sa thèse soutenue au MIT, démontra l'intérêt de la manipulation directe à l'aide d'un dispositif de désignation. Son système, le Sketchpad, fondé sur l'utilisation d'un stylo optique offrait pour la première fois aux utilisateurs la possibilité de réaliser un certain nombre de tâches d'interactions (sélection, déplacement, changement de taille). Alan Kay, au Xerox PARC en 1977, établit les principes fondateurs d'un ordinateur pour tous, basé sur le concept de la manipulation directe d'objets symbolisés par des icônes. Son idée aboutit en 1982 à l'ancêtre de notre ordinateur personnel, le Xerox Star (figure 3.2 - à droite), qui ancrera durablement la souris comme le périphérique d'entrée grand public et la métaphore du bureau comme une représentation optimale du système de fichier. Steve Jobs, à la suite d'une visite au Xerox PARC, s'inspira des concepts du Star pour concevoir l'Apple (1984) qui rencontra un succès commercial indiscutable. Son interface graphique innovante intégrait des techniques d'interaction et des métaphores que l'on retrouve encore à notre époque : les menus déroulants, la barre de menus, le copier-coller, la corbeille...

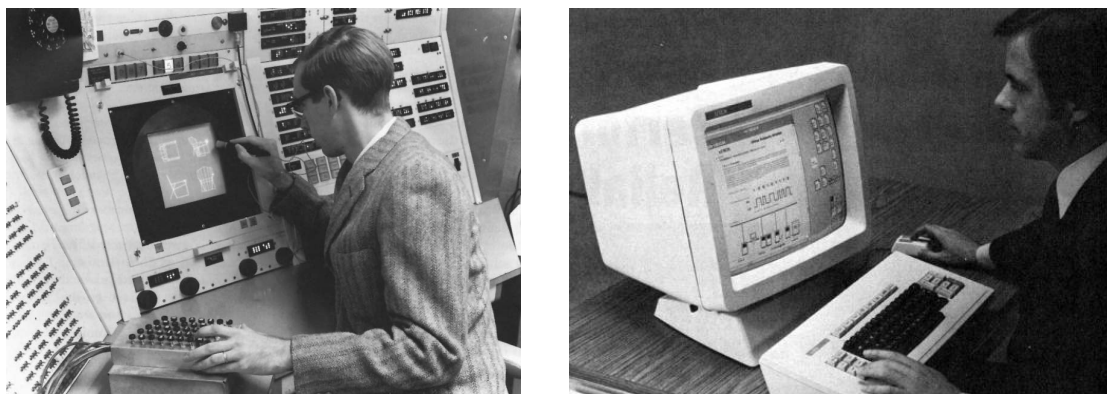


Fig. 3.2 (à gauche) le Sketchpad de Sutherland (1963) et (à droite) le Xerox Star (1982).

Selon Van Dam [VAN97], le paradigme WIMP présente l'avantage de faciliter l'apprentissage, l'utilisation, et le transfert des compétences d'une application à une autre. Pourtant comme le précise Beaudouin-Lafon [BEA04], les interfaces WIMP semblent avoir atteint une limite par rapport à l'apparition de nouveaux challenges. En l'effet, l'accroissement exponentiel de la quantité d'information à traiter, la répartition de cette information au niveau de nombreux ordinateurs et la variété du type d'utilisateurs engendrent une multiplicité des compétences, besoins et attentes. Cette remarque est évidemment valable pour les interfaces 3D destinées à des experts scientifiques qui souhaitent manipuler des données de plus en plus complexes et volumineuses dans le cadre d'activités qui doivent être exécutées en un minimum de temps.

Pour cette raison, de nombreux chercheurs se sont penchés sur l'élaboration d'une nouvelle génération d'interfaces utilisateurs dites Post-WIMP [VAN97]. Ces interfaces tentent d'imposer d'autres modes de communication axés sur la reconnaissance des gestes, de la parole ou encore sur de nouvelles modalités sensorielles comme le retour haptique. De nombreux périphériques d'entrée et de sortie sont apparus ces deux dernières décennies afin de faciliter l'immersion⁵ de l'utilisateur dans un environnement virtuel et de dépasser les limites imposées par la souris et les écrans standards. Il est possible par exemple de citer les gants de données, les interfaces tangibles, les visiocasques, les CAVEs (CAVE Automatic Virtual Environment)... Toutes ces innovations contribuent à un enrichissement conséquent

⁵ L'immersion est la sensation de présence physique dans un environnement virtuel ressentie par un utilisateur dans un système de réalité virtuelle.

des choix dont peut disposer un concepteur de système interactif. Pourtant les domaines d'applications de ces outils restent extrêmement spécifiques et aucun standard équivalent au principe WIMP ne semble émerger à l'heure actuelle comme vecteur de l'action de l'utilisateur sur le système. Il apparaît évident que le paradigme WIMP reste d'actualité pour de multiples utilisateurs et nécessite d'être enrichi par de nouvelles techniques d'interaction [COL04]. Pour cette raison, l'ensemble des solutions que nous avons mises en place s'articulent autour d'une interface graphique traditionnelle et peuvent être accomplies sur une station de travail standard à l'aide de la manipulation directe de composants graphiques.

3.2 Principes informatiques pour l'interaction 3D

Avant d'amorcer une description détaillée de nos propositions, il est utile de définir brièvement un ensemble de notions propres à l'interaction avec une scène 3D. Une scène 3D dispose d'un repère fixe, appelé repère de la scène, au niveau duquel sont référencés les objets, les lumières et la caméra. Afin d'obtenir une représentation de la scène sous la forme d'une image 2D, il est nécessaire de convertir les coordonnées des objets 3D en coordonnées pixels à l'écran. Cette conversion se fait à l'aide d'opérations successives de transformations. Les transformations de modélisation permettent de changer l'orientation et la position des objets. Les transformations de visualisation se basent sur le changement du repère de la caméra afin de modifier le point de vue adopté sans modifier les coordonnées des objets. Généralement l'axe Z du repère de la caméra aussi appelé **vecteur regard**, coïncide avec la direction de visée vers un point appelé centre de la caméra. Enfin, les transformations de projection et de cadrage déterminent respectivement le type de perspective et la région occupée à l'écran par l'image.

Les outils que nous avons élaborés sont fondés majoritairement sur des transformations de visualisation contrôlées par l'utilisateur au moyen d'un périphérique d'entrée. Par usage, le terme de navigation est employé pour qualifier ces changements d'orientation et de position de la caméra. Même si au niveau informatique les principes sont similaires, il convient de bien différencier d'un point de vue du modèle conceptuel « pensée » par l'utilisateur les notions de manipulation et de navigation. En effet en fonction de la traduction des mouvements du périphérique pour déplacer la caméra, l'action engendrée dans le monde virtuel aura une signification particulière pour les utilisateurs.

Le terme de **manipulation** de la scène est utilisé lorsque les mouvements du périphérique réalisés par l'utilisateur sont congruents avec le déplacement des objets à l'écran. Par exemple, un déplacement du périphérique effectué de la gauche vers la droite provoque une translation identique des objets de la scène. Pour l'utilisateur, cette action est analogue à la manipulation d'un objet réel qu'il tiendrait dans ses mains. En revanche, le terme de **navigation** doit être employé lorsque les déplacements des objets de la scène sont inversés par rapport aux mouvements du périphérique. La navigation est principalement rencontrée dans les tâches de locomotion au sein d'environnement virtuel. Le même mouvement du périphérique de la gauche vers la droite va provoquer un déplacement inverse des objets comme si l'utilisateur évolue de manière égocentrée dans la scène. Les changements du point de vue sont conditionnés par les transformations géométriques que sont les translations et les rotations. Les transformations possibles dans un espace de représentation sont aussi qualifiées de degrés de liberté (ddl)⁶. Six degrés (trois translations et trois rotations) sont nécessaires pour effectuer l'ensemble des déplacements de la caméra. Une primitive de contrôle est le terme qui définit un degré ou combinaison de degrés disponibles à un moment donné au niveau d'une vue 3D. Une primitive de contrôle peut donc être composée par un ou plusieurs degrés de liberté.

3.3 Exploration adaptive

L'exploration de la donnée (étape 1 - fig 1.5) dans une vue 2D relève d'une activité relativement triviale. Elle se résume à un défilement des sections affichées en plein écran à l'aide d'un bouton de l'interface qui incrémente leurs coordonnées respectives. Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre 1, dans une vue 3D, cette tâche est relativement plus complexe à mettre en oeuvre. Afin que la perspective et la distance n'altèrent pas la visualisation de la section affichée, l'utilisateur doit non seulement spécifier les coordonnées des sections mais aussi ajuster le point de vue de la caméra de la scène pour que cette section soit parfaitement orthogonale au vecteur regard. Pour chaque nouvelle section affichée, une manipulation du volume dans l'espace de représentation est donc nécessaire. L'activité est donc notablement plus complexe, en particulier pour des utilisateurs peu familiers avec la 3D et le contrôle de plus de deux ddl. Ce problème est d'autant plus évident dans le cas d'un

⁶ La notion de ddl est aussi utilisée pour décrire les mouvements dont dispose un périphérique d'entrée.

défilement en *randomline* où chaque section affichée possède une orientation différente. Le passage à une visualisation tridimensionnelle ne doit pas représenter une contrainte lourde pour les interpréteurs.

Pour résoudre ce problème, la technique d'interaction que nous suggérons, utilise les coupes adaptives présentées dans le chapitre deux afin de lier le défilement des sections au point de vue de la caméra. Nous rappelons que le principe majeur de la coupe adaptative est d'afficher en temps réel n'importe quelle section perpendiculaire à un vecteur déterminé de l'espace. Dans notre technique d'**exploration adaptative**, le vecteur regard de la caméra est utilisé pour représenter ce vecteur afin de calculer la section affichée (figure 3.3). La position et l'orientation de la caméra définissent donc les coordonnées de la section visualisée. L'orientation de la section sismique est congruente à l'orientation du repère de la caméra, sa position est déterminée en fonction du centre de la caméra. Ainsi en manipulant la boîte englobante représentant le volume sismique, l'utilisateur va mettre à jour automatiquement la section en temps réel. Avec ce principe les sections affichées sont toujours à la même échelle et avec une orientation fixe par rapport à l'utilisateur.

Dans la vue 3D du logiciel N'D⁷ utilisé dans notre laboratoire, les utilisateurs peuvent manipuler les coupes adaptatives à l'aide de trois primitives de contrôle : (Tz), (Ry), (Tx,Ty). Ces différentes primitives de contrôle respectent un principe de verticalité auquel sont attachés les interpréteurs. Une première solution autorisant l'ensemble des changements possibles de point de vue au travers des six ddl n'ayant pas convaincu les utilisateurs. En effet l'expertise structuraliste est élaborée en fonction d'un schéma basé sur la superposition horizontale des différentes couches sédimentaires. Une exploration adaptative totalement libre s'avère donc inopérante pour les utilisateurs car elle bouleverse l'orientation de la carte cognitive établie selon une analyse verticale des couches sédimentaires.

⁷ <http://perso.orange.fr/m.donias/>

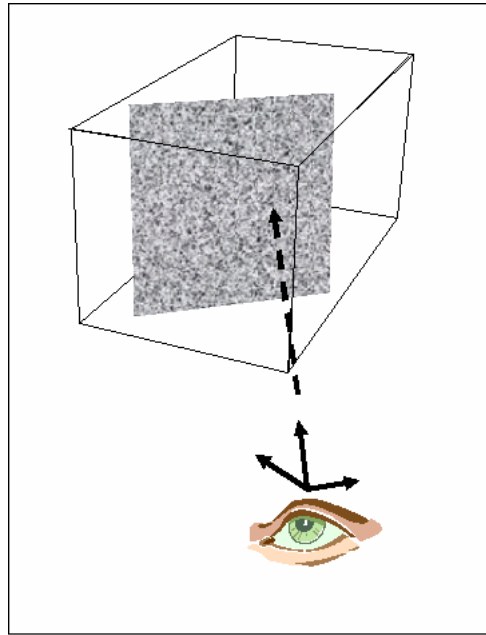


Fig. 3.3 Principe de l'exploration adaptative.

3.4 Segmentation manuelle par pointé dynamique

L'amélioration de la tâche de segmentation manuelle a constitué le principal objectif des recherches que nous avons menées. C'est durant cette étape que la représentation mentale des failles par un géologue va se matérialiser sous la forme de nuages de points. La sélection des différents pixels décrivant la faille doit être suffisamment précise et riche pour ne pas engendrer un modèle géologique faux. Pourtant, au vu de la taille des données traitées, il semble indispensable de trouver une alternative à la méthode traditionnelle de pointé statique.

La segmentation manuelle de structures 3D est une tâche qui ne se limite évidemment pas uniquement aux données géologiques. Certains chercheurs ont expérimenté différentes méthodes pour cette tâche particulière. Harder et Al dans le cadre des données biomédicales [HAR02], proposent une solution multimodale axée sur un dispositif à retour haptique. Le retour de force facilite la segmentation en fournissant un indice de profondeur traité par le système moteur complémentaire au traitement visuel. Cette approche facilite l'obtention d'un squelette de la structure 3D considérée. Serra et Al [SER97] utilise un bureau de travail virtuel (*workbench*) pour l'extraction de vaisseaux sanguins en temps réel. Sa technique permet de sélectionner des zones d'intérêts sur des coupes 2D en affichant l'image médicale virtuelle dans le même espace de représentation que le dispositif de pointé, rendant ainsi plus

facile la coordination des yeux et des mains. Malheureusement ces exemples, comme la majorité des solutions rencontrées dans la littérature, s'articulent autour d'un pré-traitement de la donnée et de l'utilisation de dispositifs d'interaction relativement invasifs. Or, dans le cadre de notre étude, il est impératif de ne pas biaiser la prise de décision en altérant la donnée originelle. De plus comme nous l'avons déjà précisé, la tâche de détection supervisée doit pouvoir s'accomplir sur des postes informatiques standards.

Les techniques d'interaction que nous allons présenter dans le cadre de la segmentation manuelle intègrent l'ensemble de ces contraintes opérationnelles. Pour rappel, la tâche de segmentation manuelle ou pointé se décompose en deux tâches d'interaction distinctes :

- la tâche de **défilement** consiste à mettre à jour la coupe affichée en modifiant ses coordonnées. Cette tâche permet aux interpréteurs de localiser la faille à extraire à partir de la visualisation des sections qui la contiennent.
- une tâche de **sélection** qui est un marquage des pixels appartenant à la faille cible sur chacune des sections visualisées.

Les techniques d'interactions seront décrites à partir de ces deux tâches. Une comparaison de ces techniques au niveau de la tâche de sélection sera mise en œuvre à l'aide d'une taxonomie que nous allons maintenant définir.

3.4.1 Catégorisation des tâches de sélection

Dans le domaine des tâches d'interactives de sélection, la tâche d'acquisition de cible statique a largement été étudiée en IHM d'un point de vue du contrôle moteur [CAR83]. On la réalise quotidiennement pour sélectionner les icônes sous le bureau dans la majorité des systèmes d'exploitation. Elle reste en effet une pierre angulaire du style d'interaction WIMP. Son paradigme est fondé sur la réalisation de mouvements ciblés, par une désignation directe de cible, au moyen d'un périphérique de pointé (généralement la souris). En proposant en 1954, une modélisation inspirée par la théorie de l'information, Fitts [FIT54] a fournit un outil précieux pour l'évaluation des interfaces et pour la caractérisation des techniques d'interaction dans le cadre des tâches d'acquisition de cible statique.

Les tâches de sélection impliquées dans les deux techniques dynamiques proposées se classent en revanche dans la catégorie des *tâches trajectorielles* étudiées en IHM par Accot [ACC01][ACC99]. Accot [ACC01] a catégorisé et proposé une modélisation pour ces tâches basée sur une extension de la loi de Fitts [FIT54]. Par définition, une tâche trajectorielle est une tâche continue pour laquelle un opérateur humain doit mettre en jeu un mouvement canalisé le long d'une trajectoire spécifique. Cette tâche est rencontrée durant la navigation dans un menu hiérarchique au sein d'une interface graphique. A la différence des tâches d'acquisition de cible statique, ce ne sont pas uniquement les points de départ et d'arrivée qui conditionnent le bon déroulement de la tâche mais l'ensemble du mouvement réalisé par le curseur.

3.4.1.1 Taxonomie des tâches trajectorielles

Les taxonomies sont des outils descriptifs utilisés pour catégoriser et classer un phénomène particulier. En IHM, de nombreuses catégorisations ont été créées pour les périphériques d'entrée, les tâches ou les styles cognitifs... Afin de comparer les tâches de sélection trajectorielles impliquées dans nos deux techniques proposées, il semble pertinent de mener une analyse au moyen d'une de ces taxonomies. La thèse de Accot [ACC01], fournit une décomposition taxonomique particulièrement intéressante pour les tâches trajectorielles en fonction de sept dimensions.

Boucle ouverte ou fermée (BO, BF) : Du point de vue du contrôle moteur une tâche en boucle ouverte est planifiable à l'avance et ne nécessite aucun contrôle dynamique d'erreur. Une tâche en boucle fermée va au contraire contraindre à une correction systématique de l'erreur à l'aide d'une analyse continue du retour visuel.

Ouverte ou fermée (O, F) : Une tâche est ouverte si l'environnement est changeant spatialement et/ou temporellement et non prédictible par le sujet. En revanche, pour un environnement stable et prédictible la tâche peut être autorégulée et planifiée, elle est donc fermée.

Critique ou non critique (C, NC) : Une tâche critique impose à l'utilisateur une forte implication morale ou physique et présente un caractère irrévocable. Une tâche est non critique, si elle autorise un résultat incomplet, si son achèvement n'est pas obligatoire et si aucune notion de danger n'est liée à l'échec de son exécution.

Sémiotique, ergotique ou épistémique (SM, ER, EP) : Une tâche sémiotique a la capacité de transmettre une information. Une tâche ergotique a pour fonction la manipulation d'objet dans un environnement. Une tâche épistémique a pour enjeu principal la découverte d'un environnement.

Cognitive ou perceptuomotrice (CO, PM) : Une tâche cognitive implique des processus de haut niveau de type décisionnels et intellectuels. Une tâche est perceptuomotrice, si elle sollicite uniquement la boucle perception/action.

Intégrale ou séparable (I, S) : Une tâche est intégrale si ses variables ne peuvent pas être séparées sans perte de performance à l'inverse d'une tâche séparable.

Tâche morphocinétique ou topocinétique(MC,TC) : Un mouvement morphocinétique est libre et ne répond à aucune contrainte. Un mouvement topocinétique est limité dans son accomplissement par des contraintes spatiales.

3.4.2 Approche traditionnelle : le Pointé Statique (PS)

Le **pointé statique** (PS) évoqué dans le chapitre 1, est le nom de la technique 2D utilisée historiquement par les interpréteurs. Elle reste à l'heure actuelle la solution adoptée par une grande partie des géologues structuralistes. Les experts considèrent le PS comme une technique relativement sûre car précise bien qu'elle soit réputée particulièrement fastidieuse. Elle se fonde sur un défilement discret des sections dans une vue 2D et une sélection point par point des pixels décrivant la faille cible.

3.4.2.1 Défilement par PS

Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre deux, le défilement discret a pour principal désavantage de limiter le nombre de sections étudiées (10% de la donnée) et de complexifier la construction mentale de la faille par une visualisation parcellaire et incomplète. Nous ne reviendrons pas sur les problèmes liés à l'utilisation d'une vue 2D pour conceptualiser une structure 3D qui ont été largement développés dans le chapitre précédent.

3.4.2.2 Sélection par PS

La tâche de sélection point à point mise en œuvre dans cette approche est classée parmi les tâches d'acquisition de cible statique. Ce choix d'acquisition nécessite une multiplicité des actions de validation (cliques) sur le périphérique de la part des utilisateurs. En effet pour chaque point déposé sur la donnée une acquisition de cible est requise. Même si cette technique présente l'avantage d'être relativement bien maîtrisée et précise, elle engendre une restriction notable de la bande passante entre l'utilisateur et son nuage de points.

3.4.3 Approche automatique : le Pointé Dynamique Automatique (PDA)

La première technique que nous proposons comme alternative au PS pour la segmentation manuelle, le **pointé dynamique automatique** (PDA) a pour principal atout de tirer partie de l'animation des sections se basant sur une visualisation 2D + temps. Notre technique s'inspire de la métaphore de **planification de chemin** (*route planning*), traditionnellement utilisée en réalité virtuelle pour les tâches de navigation [IGA98]. Plus précisément, Bowman et Al [BOW05] la catégorise parmi les techniques d'interaction dédiées aux tâches de déplacement (*travel*) : la composante motrice de la navigation. La planification de chemin est connue comme une alternative aux autres modes de déplacement particulièrement efficace qui autorise l'accomplissement optimal d'une deuxième tâche en parallèle. L'idée est de décrire dans un premier temps les étapes du chemin directement dans l'environnement à partir d'un point de vue exocentré. Le système va ensuite déplacer automatiquement la caméra le long de la trajectoire planifiée pour permettre une sélection efficace des points d'acquisition.

3.4.3.1 Défilement par PDA

En appliquant ce concept à notre problématique, nous offrons à l'utilisateur l'opportunité de définir au préalable l'orientation et la position des sections qui seront affichées. Dans notre interface 3D à partir de n'importe quelle section *timeslice* du bloc, l'utilisateur dépose un ensemble de balises décrivant un chemin le long de la faille à segmenter. Une fois ce chemin planifié, la caméra est replacée automatiquement le long de la trajectoire. A l'aide du principe de coupe adaptive, les sections orthogonales au chemin vont être successivement affichées à une cadence prédéfinie. Dans cette technique, c'est la trajectoire prédéfinie qui est utilisée comme vecteur orthogonal pour déterminer quelles seront les sections affichées (figure 3.3). Le déroulement de l'animation est contrôlé par une série de commandes disponibles au niveau de boutons de l'interface ou de raccourcis clavier. Il est ainsi possible de geler, accélérer, ralentir et inverser l'animation. Pour éviter des problèmes de visualisation engendrés par une

caméra statique lors des changements de section (changement d'échelle et mauvaise orientation des sections), le déplacement de la caméra de la scène est indexé sur chacune d'elles. En résumé, à la différence de l'exploration adaptative, ce n'est pas le vecteur regard mais le chemin qui définit l'orientation et la position des sections et de la caméra.

3.4.3.2 Sélection par PDA

Afin d'augmenter la largeur de la bande passante entre l'utilisateur et le nuage de points par rapport au PS, nous nous appuyons sur l'animation pour supplanter l'acquisition discrète par une acquisition continue. Durant le défilement automatique, l'utilisateur déplace son curseur le long de la faille cible en laissant le bouton d'acquisition du périphérique enclenché. Le système enregistre automatiquement l'ensemble des points jusqu'à ce que le bouton soit relâché. En fonction du déplacement effectué par le périphérique, un nuage de points relativement dense pourra être obtenu. L'agencement des points va dépendre de deux facteurs : la vitesse de défilement de l'animation et le compromis temps/précision adopté par l'utilisateur pour déplacer son curseur.

Cette tâche de sélection effectuée durant le PDA peut être définie à partir de la taxonomie de Accot [ACC01] :

- Boucle fermée (BF) : L'utilisateur doit contraindre son pointé le long de la trajectoire en corrigeant continûment la position de son curseur par rapport à la localisation de la faille
- Ouverte (O) : L'aspect dynamique du défilement et la géométrie variable de la faille impliquent une imprédictibilité de l'environnement.
- Non critique (NC) : Même si cette tâche doit être réalisée avec le plus de précision possible son résultat n'a pas un caractère irréversible du fait qu'il est possible de modifier les points retenus a posteriori.
- Sémiotique (SM) : L'objectif des interpréteurs est de transmettre une information sur la géométrie de la faille. Le pointé transporte donc une information qui servira de base à l'élaboration d'une prise de décision ultérieure.

- Perceptuomotrice (PM) : C'est durant l'exploration que l'interpréteur analyse et mène son expertise. La phase de segmentation est la mise en œuvre manuelle de réalisation de cette expertise.
- Intégrale (I) : La tâche de sélection étant une tâche d'interaction de base, elle ne peut pas se décomposer en d'autres sous tâches.
- Topocinétique (TC) : la faille contraint spatialement le pointé en fonction de sa structure géométrique.

Ce type de sélection selon les travaux de Accot est proche de la catégorie des tâches de *capture de cible mobile (tracking)* classées dans les tâches trajectorielles. Selon Accot, les captures de cible mobile sollicitent de nombreuses ressources attentionnelles, requièrent de la concentration et de la maîtrise de la part de l'utilisateur. Nos observations durant la mise en oeuvre de cette technique ont pu confirmer ces affirmations et mettre en évidence une chute des performances en terme de précision par rapport au PS.

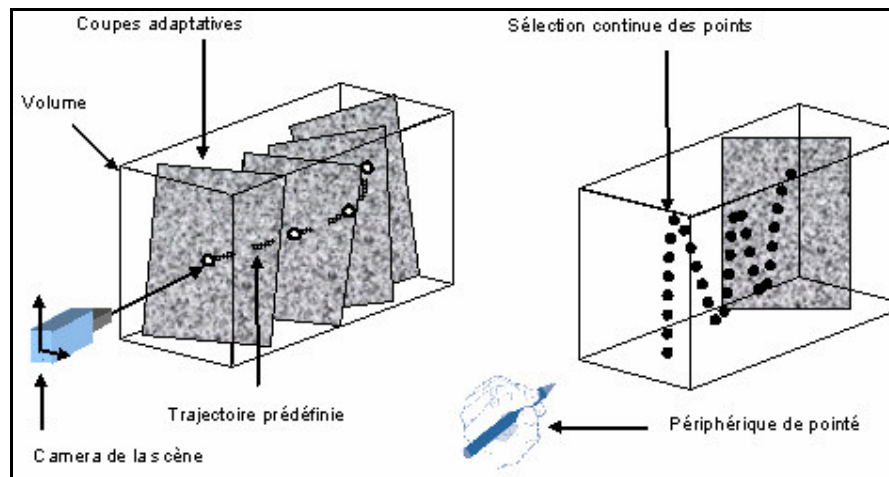


Fig. 3.4 Le mode de défilement du pointé dynamique (à gauche) et la sélection trajectorielle continue durant l'animation (à droite).

3.4.4 Approche bi manuelle : le Pointé Dynamique Manuel (PDM)

La deuxième technique développée dans notre travail est fondée sur le fait que nos deux mains sont utilisées quotidiennement dans l'accomplissement de nombreuses tâches de la vie courante. Pourtant, il est étonnant de remarquer que la plupart des techniques d'interaction n'utilisent qu'une seule main et que la majorité des compétences que nous avons pu acquérir au cours de l'évolution et tout au long de notre existence ne sont pas mobilisées pour interagir avec les ordinateurs [BUX05]. L'emploi de nos mains est asymétrique, chacune d'elle en fonction de notre latéralité est utilisée pour des tâches spécifiques menées en coopération. On peut citer par exemple la tâche d'écriture sur papier où la main dominante écrit pendant que la main non dominante oriente et positionne la feuille sur la table. Pour intégrer ce principe les concepteurs en IHM se basent généralement sur le modèle de la chaîne cinématique asymétrique introduit par Guiard [GUI87] pour décrire les compétences bi manuelles. En résumé selon lui, la main non dominante sert de cadre aux mouvements effectués avec la main dominante :

- La main non dominante : guide et fixe le cadre de référence pour la main dominante, et réalise des mouvements grossiers.
- La main dominante : suit la main non dominante, travaille dans le cadre de référence fixé par la main non dominante et effectue des mouvements fins.

Buxton et Al [BUX05] donnent une description des propriétés temporelles impliquées dans les techniques bimanuelle afin de quantifier leurs bénéfices. La réalisation séquentielle de deux tâches à l'aide d'une seule main est coûteuse d'un point de vue des temps de changement cognitifs. Ces temps traduisent l'effort mental que doit fournir l'utilisateur pour basculer d'une tâche à la suivante. Pour effectuer ce changement de contexte avec une seule main l'utilisateur va faire appel à certains processus cognitifs et commandes motrices (si un autre périphérique est utilisé). Kabbash et Al [KAB94] ont montré expérimentalement que pour la réalisation d'une tâche composée d'une tâche de navigation et d'une tâche de sélection, des novices avec une technique bi-manuelle étaient plus efficaces que des experts utilisant une seule de leur main.

Le pointé dynamique manuel se révèle donc être une variante bi-manuelle du PDA. Nous pensons que cette approche bimanuelle est plus efficace que la technique de PS, en raison d'une réduction du temps nécessaire à l'enchaînement et à l'exécution des actions motrices et des opérations cognitives. La figure 3.5 présente un exemple de durées d'exécution de la tâche de défilement (**D**) et de sélection (**S**) au moyen du PS inspiré de [BUX05]. Même si un seul périphérique est employé pour l'exécution de ces deux tâches, les **temps de changement** inter-tâches sont relativement élevés. Il s'agit d'un des aspects négatifs du PS d'un point de vue de l'effort que doivent fournir les utilisateurs lors de l'enchaînement de deux actions.

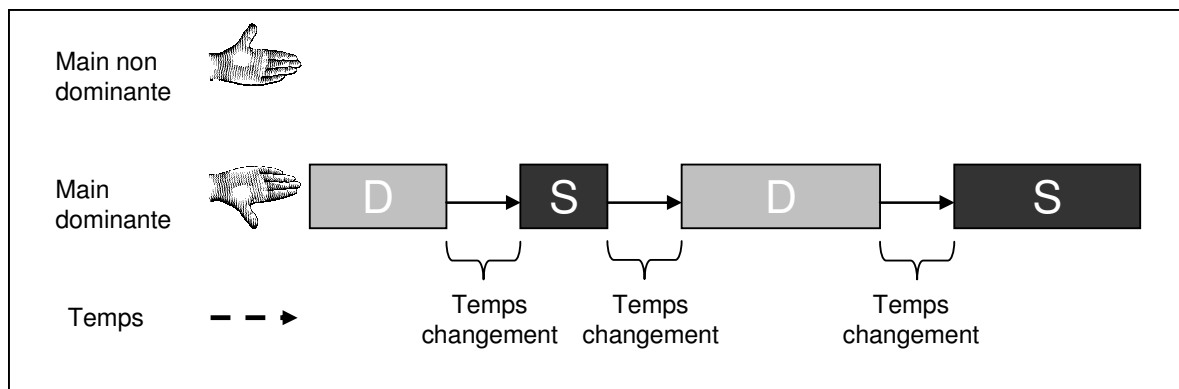


Fig. 3.5 Durées d'exécution des tâches de défilement (D) et de sélection (S) pour le PS.

Le PDA (figure 3.6) autorise un accomplissement en parallèle des deux tâches. Le défilement étant contrôlé par le système, l'utilisateur avec sa main dominante sélectionne les points. Cette méthode est avantageuse car elle donne à l'utilisateur l'opportunité de focaliser son attention uniquement sur l'acquisition et permet une réalisation de la tâche en beaucoup moins de temps.

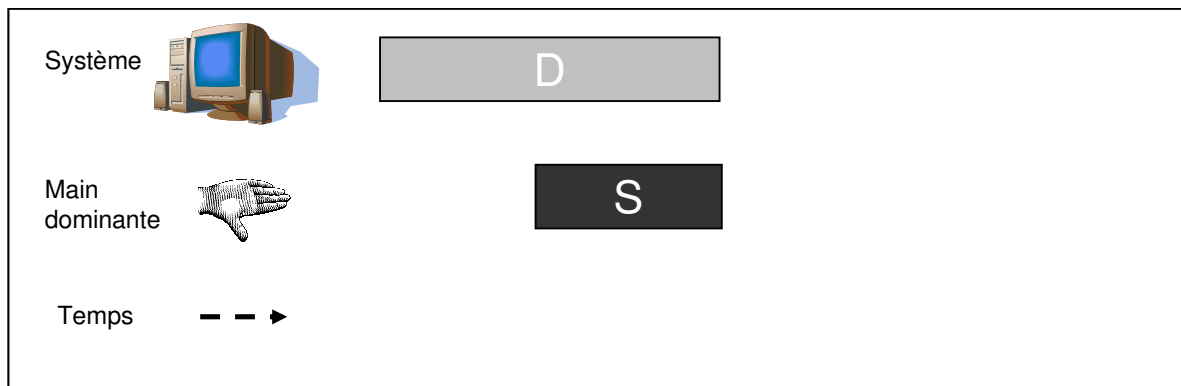


Fig. 3.6 Durées d'exécution des tâches de défilement (D) et de sélection (S) pour le PDA.

Le PDM a l'avantage de réduire la durée du pointé par rapport au PS tout en laissant à l'utilisateur la pleine maîtrise du défilement (figure 3.7). En effet comme nous l'avons mentionné le basculement de contexte à un niveau cognitif est beaucoup plus rapide en interaction bi-manuelle.

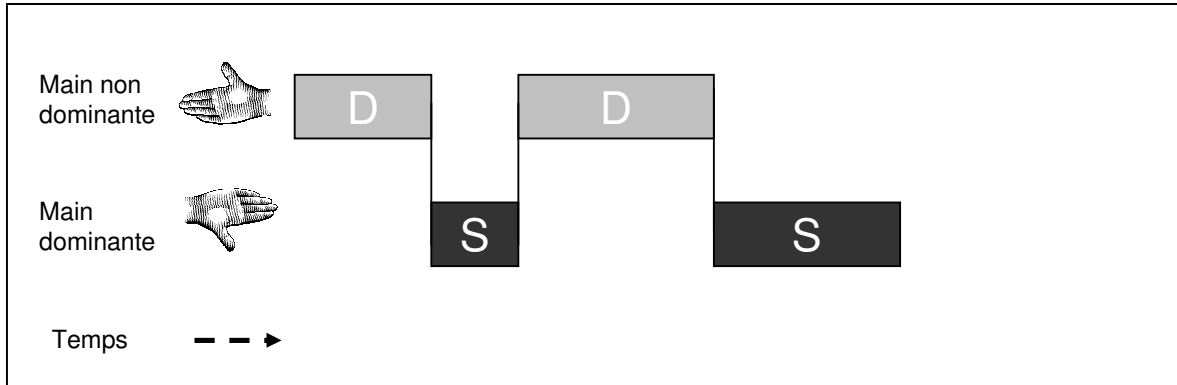


Fig. 3.7 Durées d'exécution des tâches de défilement (D) et de sélection (S) pour le PDM.

Le PDM constitue donc un compromis entre les deux autres techniques tirant profit de nos compétences bimanuelles. D'après le modèle de Guiard [GUI87], la sélection, étant une tâche précise, doit s'effectuer avec la main dominante alors que le défilement, qui fixe le cadre de référence, doit être contrôlé avec la main non dominante.

3.4.4.2 Défilement par PDM

Après avoir défini un chemin spécifique dans la donnée, l'utilisateur va contrôler manuellement avec sa main non dominante le défilement des sections au moyen d'un périphérique dédié (clavier, souris 3D ou molette de la souris). Ce défilement continu peut s'opérer dans les deux sens possibles en fonction des besoins de l'utilisateur. L'utilisateur arrête ou ralenti le défilement à chaque fois qu'il veut sélectionner précisément des points le long d'une faille cible.

3.4.4.3 Sélection par PDM

Au moyen de sa main dominante, l'utilisateur sélectionne les points le long de la faille ciblée à l'aide d'un périphérique de pointé. Pour cette sélection, de même que pour le PDA, les points sont acquis continûment le long de la trajectoire obtenue durant le déplacement du curseur. En revanche, à la différence de la technique automatique, cette acquisition des points est menée quand la vitesse d'animation est quasi nulle. Ce principe est isomorphe avec le

geste crayonnage sur carte papier que les géologues accomplissaient il y a encore quelques années. La géométrie du nuage de points obtenue dépend uniquement du compromis temps/précision adopté par l'utilisateur lui-même conditionné par la variabilité ou largeur effective de la faille cible. Pour décrire la tâche sélection du pointé dynamique manuel, on retrouve les mêmes dimensions (boucle fermée, non critique, sémiotique, perceptumotrice, intégrale et topocinétique) excepté une seule :

- Fermée : La sélection étant effectuée sur une section statique, l'environnement n'est pas changeant et l'utilisateur peut à l'avance planifier son geste.

3.4.5 Comparaison des tâches de sélection pour les pointés dynamiques

Le tableau 3.8 décrit la tâche de sélection par pointé dynamique automatique (PDA), la tâche de capture de cible mobile (CCM) selon Accot [ACC01], la tâche de sélection par pointé dynamique manuel (PDM) et la tâche d'écriture/dessin (ED) selon l'étude d'Accot, elles sont toutes des tâches trajectorielles. Le PDA se différencie uniquement de la CCM au niveau de sa capacité à véhiculer une information à caractère sémantique. La seule dimensionnalité qui n'est pas commune entre le PDM et l'ED provient de la contrainte spatiale du mouvement impliqué. Le PDA et PDM diffèrent sur l'imprédictibilité de l'environnement dynamique résultant du défilement automatique. Cette imprédictibilité sera la raison majeure d'une perte de précision observée du PDA par rapport au PDM.

PDA	BF	O	NC	SM	PM	I	TC
CCM	BF	O	NC	EG	PM	I	TC
PDM	BF	F	NC	SM	PM	I	TC
ED	BO	F	NC	SM	PM	I	MC

Fig. 3.8 Description des tâches sélection selon la taxonomie de Accot [ACC01].

3.5 Etude des périphériques d'entrée

Un périphérique d'entrée est un dispositif mécanique qui traduit un déplacement en un signal interprété par le système informatique. Jacob et Al [JAC94] rappelle que la conception des périphériques et des techniques d'interaction qui leurs sont associées, a généralement été guidée par des enjeux technologiques plutôt que par la performance humaine. Pour concevoir et choisir des périphériques et des techniques efficaces, il est nécessaire de comprendre la tâche, le périphérique et les relations qui les lient du point de vue de l'utilisateur. Buxton, dans [NOR86], nous invite à imaginer ce que pourrait penser une civilisation du future sur la physiologie des hommes de notre époque en déterrants les périphériques d'un ordinateur personnel. Leur conjecture serait que l'homme du vingtième et unième siècle possède des yeux surdimensionnés, une longue main droite, un bras gauche plus court, des doigts de taille uniforme et des oreilles basse-fréquences. La conception de périphérique guidée uniquement par des aspects technologiques s'est sensiblement inversée avec la prise en compte des facteurs humains. Il est incontestable que la souris reste le périphérique emblématique pour la plupart des utilisateurs dans le cadre d'un style d'interaction WIMP. Néanmoins l'émergence de la visualisation 3D et des champs disciplinaires qui en découlent a pu engendrer une diversification et une complexification des tâches à accomplir. Pour cette raison, de nombreux dispositifs d'entrée ont vu le jour, induisant un élargissement notable des choix mis à la disposition des concepteurs. Pour solutionner ce problème, certains chercheurs ont pris le soin de catégoriser au moyen de taxonomies ces périphériques selon leurs différentes caractéristiques [SHN98], [NOR86], [FOL84], [ZHA95].

3.5.1 Taxonomies des périphériques d'entrée

Ce paragraphe présente au travers de différentes taxonomies, les principales caractéristiques des périphériques d'entrées consacrés à l'acquisition de cible et à la manipulation de six ddl. En réalité, chaque catégorie des périphériques se décline en un nombre incalculable de produits avec des technologies et des designs particuliers qui influencent évidemment la qualité du dispositif.

3.5.1.1 Périphériques de pointé

Les périphériques de pointé, particulièrement dans le cadre de l'interaction WIMP, sont dédiés à la désignation de cibles au sein d'une interface graphique. Ces dispositifs matériels

permettent de contrôler le déplacement du curseur et la sélection de cible au sein d'une interface graphique. Shneiderman [SHN98] propose dans son ouvrage, une répartition de ces périphériques en deux catégories : les périphériques de contrôle direct et les périphériques de contrôle indirect.

Les périphériques de contrôle direct autorisent une désignation immédiate de la cible sur l'écran. Les crayons optiques, les écrans tactiles ou les tablettes écrans appartiennent à ce groupe. Leurs avantages sont de faciliter l'apprentissage et d'être d'une utilisation relativement intuitive. Leurs désavantages sont d'engendrer chez l'utilisateur une fatigue musculaire significative et de masquer la partie de l'écran où se situe la main.

Les périphériques de contrôle indirects se répartissent en deux sous catégories : absolu et relatif. Dans le cas absolu, la position du périphérique sur la surface de support sur laquelle il repose, correspond à une localisation précise sur l'écran. La tablette graphique est le dispositif le plus connu appartenant à ce groupe. Au contraire, pour les dispositifs relatifs, le déplacement du curseur est fonction de la trajectoire physique effectuée. La vitesse du curseur à l'écran est définie par une valeur de gain. Ce gain correspond au ratio entre le déplacement du curseur à l'écran défini par une fonction de transfert et le déplacement physique du périphérique. Une valeur de gain élevée sera utilisée pour accomplir des mouvements de forte amplitude alors qu'une valeur faible servira pour la mise en place de mouvements fins et précis. La souris, le joystick et le touchpad constituent des exemples de périphériques relatifs. La contrainte majeure des périphériques indirects est liée aux nombreux traitements cognitifs nécessaires pour traduire le mouvement horizontal du périphérique sur un affichage vertical. Cette coordination œil-main nécessite un temps d'apprentissage important avant d'atteindre un niveau de maîtrise acceptable. En revanche, ces dispositifs reposant sur un support stable, autorisent une utilisation soutenue sans occasionner de fatigue musculaire importante.

3.5.1.2 Périphériques de manipulation à six degrés de liberté

Zhai [ZHA95] a proposé une classification pour les périphériques à six ddl, en fonction de leur mode de résistance par rapport à la force appliquée par l'utilisateur, répartie en deux catégories principales : isotonique et isométrique. Les périphériques isométriques sont définis comme des dispositifs rigides et statiques qui induisent des mouvements proportionnels aux forces qui leur sont appliquées. Ces périphériques reposent sur des supports stables et ne nécessitent pas la réalisation de mouvements de forte amplitude. De ce fait, leur utilisation est

peu contraignante en terme de fatigue motrice. En revanche, comme nous le verrons avec l'exemple de la souris 3D, le contrôle de ce type de dispositif est généralement complexe. Les périphériques isotoniques sont des dispositifs dont le déplacement libre dans l'espace réel est directement retranscrit dans l'espace numérique. A la différence des solutions isométriques, les dispositifs de cette catégorie sont faciles à contrôler mais nettement plus fatigants d'un point de vue moteur. La retranscription des déplacements physiques du périphérique vers le système est conditionnée par le choix d'une fonction de transfert. Ces fonctions sont caractérisées par une valeur d'ordre de contrôle du système qui correspond à un changement de position, vitesse ou accélération. La fonction d'ordre 0 (de position) est une correspondance directe des mouvements. Une fonction d'ordre 1 associe les mouvements du périphérique à une fonction de vitesse, alors que l'ordre 2 est une fonction accélération. Selon une étude de Zhai et Milgram, les périphériques isotoniques fonctionnent de manière optimale avec une fonction de contrôle de position et les périphériques isométriques avec une fonction de contrôle de vitesse [ZHA98].

3.5.2 Périphériques d'entrée dédiés à la détection supervisée

En nous basant sur cette catégorisation, nous proposerons une sélection des dispositifs les mieux adaptés à la tâche de détection supervisée. Cette démarche s'appuie sur le fait que le périphérique d'entrée est un élément indispensable à la technique d'interaction pour franchir la distance d'exécution entre le but de l'utilisateur et le système.

3.5.2.1 Contrôle de l'exploration adaptative

Pour accomplir la tâche exploration par coupes adaptatives dans une scène 3D, en modifiant simultanément la section affichée et le point de vue, plusieurs dispositifs ont pu être envisagés. Pour réaliser l'ensemble des changements de position et d'orientation de ces coupes l'utilisateur doit pouvoir disposer des six degrés de liberté.

La *cubic mouse* [FRO00] est un périphérique spécialisé dans l'interaction de données visualisées en coupe (figure 3.9). Ce périphérique est composé par un cube perforé par trois bâtonnets qui peuvent être tournés, poussés et tirés. Le cube référencé dans l'espace à la manière d'un périphérique isotonique va servir à la manipulation d'un objet dans la scène 3D. Les bâtonnets sont destinés à manipuler un élément particulier de cet objet selon les axes X, Y et Z. Les auteurs ont étudié ce dispositif dans le contexte particulier des données sismiques où

le cube contrôle l'orientation et la position du volume tandis que les bâtonnets sont utilisés pour faire défiler les sections sismiques selon les trois axes.

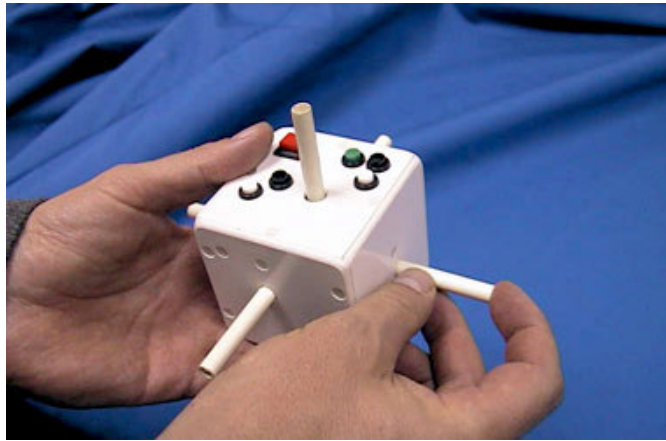


Fig. 3.9 La Cubic Mouse [FRO00].

Une approche tout aussi originale a été adoptée par Hinckley et Al où les auteurs proposent un dispositif dédié à la manipulation de coupes 2D [HIN98] (figure 3.10). Conçu pour la visualisation neurochirurgicale, cet outil est composé par une tête de poupée et un carré de plastique. En déplaçant le carré à un endroit spécifique de la tête de poupée, le chirurgien peut visualiser à l'écran le plan oblique correspondant à une coupe cérébrale particulière. Un outil de pointé et un écran tactile complètent le dispositif afin d'autoriser une sélection 2D et 3D.

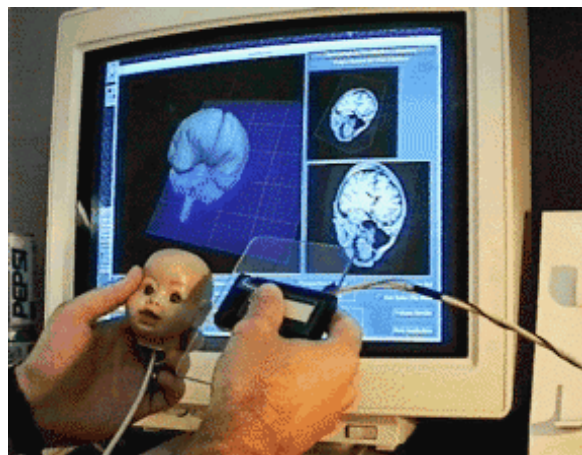


Fig. 3.10 Le dispositif de Hinckley et Al [HIN98].

Les atouts de ces deux périphériques sont de proposer une affordance⁸ perçue importante sur les actions qu'elles permettent d'effectuer. En revanche, leur mode de résistance isotonique impose aux utilisateurs un effort physique constant. Même si la scène peut être gelée (un bouton de la souris cubique est consacré à cette tâche), afin de reposer le périphérique. Ces solutions ne semblent pas adaptées à la réalisation de tâches longues et soutenues comme l'exploration de données sismiques.

Hachet et Al [HAC04] propose un périphérique d'interaction à six degrés de liberté, le CAT (Control Action Table), qui a été spécialement conçu pour le travail coopératif (figure 3.11). Le périphérique est intégré dans une table circulaire qui combine des composantes isotoniques pour les rotations et isométriques pour les translations ainsi qu'une tablette graphique pour les tâches 2D. Ses principaux atouts sont la persistance de la localisation définie par l'utilisateur et un contrôle du point de vue extrêmement intuitif. En revanche sa taille importante le destine plutôt à des applications, qui requièrent un environnement grand écran (environ 1 mètre), plutôt que pour des stations de travail standard.

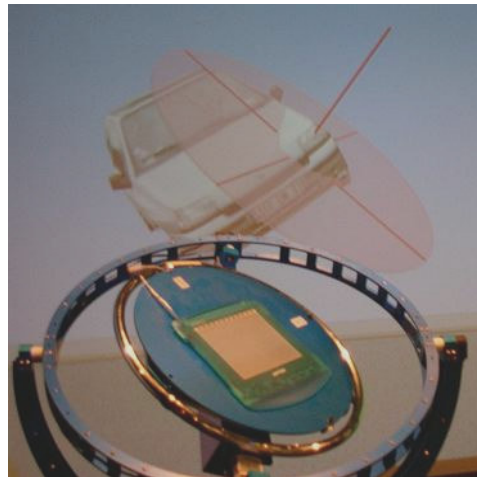


Fig. 3.11 Le CAT le périphérique de Martin Hachet [HAC04].

La *souris 3D* (figure 3.12) est un dispositif à six ddl grand public destinée au contrôle d'applications 3D. Cet outil permet un contrôle intégré ou séparé des ddl. Son mode de résistance isométrique nous est apparu particulièrement adapté à la manipulation des coupes

⁸ Le terme *affordance* provenant de l'anglais « to afford » a été introduit par Gibson pour décrire l'action suggérée par les caractéristiques perçues d'un objet. Ce terme a été popularisé par Norman dans la communauté de l'ingénierie cognitive pour décrire les actions implicitement sous-tendues par les différents composants d'une interface matérielle ou logicielle.

adaptatives. Comme nous l'avons mentionné, après avoir consulté les experts, une manipulation intégrale de l'ensemble des ddl n'est pas une solution pour la manipulation des données sismiques. Le principal désavantage de ce périphérique est qu'il ne permet pas de contrôler aisément les degrés indépendamment les uns des autres.



Fig. 3.12 La spaceball de 3D connexion.

La souris 2D « traditionnelle » a vu le jour dans les années soixante au Stanford Research Institute sous l'impulsion de Douglas Englebart. En tant que pierre angulaire de l'édifice WIMP, elle représente une référence en terme dispositif d'entrée. Il s'agit d'un périphérique relatif qui sollicite différents groupes musculaires de la main, du poignet, du bras et de l'épaule facilitant à la fois des mouvements courts et précis mais aussi rapides et de fortes amplitudes [ZHA96]. En tant que périphérique dédié à l'acquisition de cible statique en 2D, la souris ne dispose que de deux ddl qui impose le contrôle séparé des six ddl dans une vue 3D. Dans notre application, la souris est utilisée pour contrôler les différentes primitives de contrôle pour agir sur les coupes adaptives durant l'exploration. L'utilisateur doit donc changer de mode de contrôle pour pouvoir accomplir l'ensemble des actions de manipulation qui lui sont nécessaires.

3.5.2.2 Contrôle de la segmentation

L'utilisation de plus de deux ddl que peut nécessiter l'exploration adaptative n'est pas utile pour accomplir la tâche de segmentation manuelle. En effet, les deux techniques proposées (PDA et PDM) mettent uniquement en jeu une sélection 2D des points et un contrôle du défilement selon les deux directions du chemin.

Le défilement est géré automatiquement par le système dans le cadre du PDA et ne requiert aucun dispositif autre que le clavier pour intervenir sur l'animation. Pour le défilement manuel du PDM le clavier, la souris 3D ou la molette d'une souris 2D sont des solutions que nous préconisons. Dans notre application au moyen des flèches directionnelles du clavier, l'utilisateur peut animer la donnée dans les deux sens possibles le long du chemin prédéfini. Tant qu'une des touches directionnelles est enclenchée les sections sont animées en fonction d'une vitesse fixe. Quand l'utilisateur souhaite pointer une faille, il lui suffit de relâcher la touche directionnelle. Nous avons aussi implanté une solution basée sur le contrôle du défilement à l'aide d'une souris 3D, qui autorise une variation de la vitesse d'animation proportionnelle à la force appliquée par l'utilisateur. La molette de la souris 2D est aussi un choix utilisable impliquant une affordance perçue relativement correcte pour les utilisateurs.

Pour la sélection, seulement deux ddl sont utiles à la sélection planaire des points sur une section. A ce titre seuls les outils de pointé traditionnels ont retenus notre attention. Baber [BAB97], présente un classement de différents périphériques de pointé à partir des critères de vitesse, précision et de préférence des utilisateurs (figure 3.13).

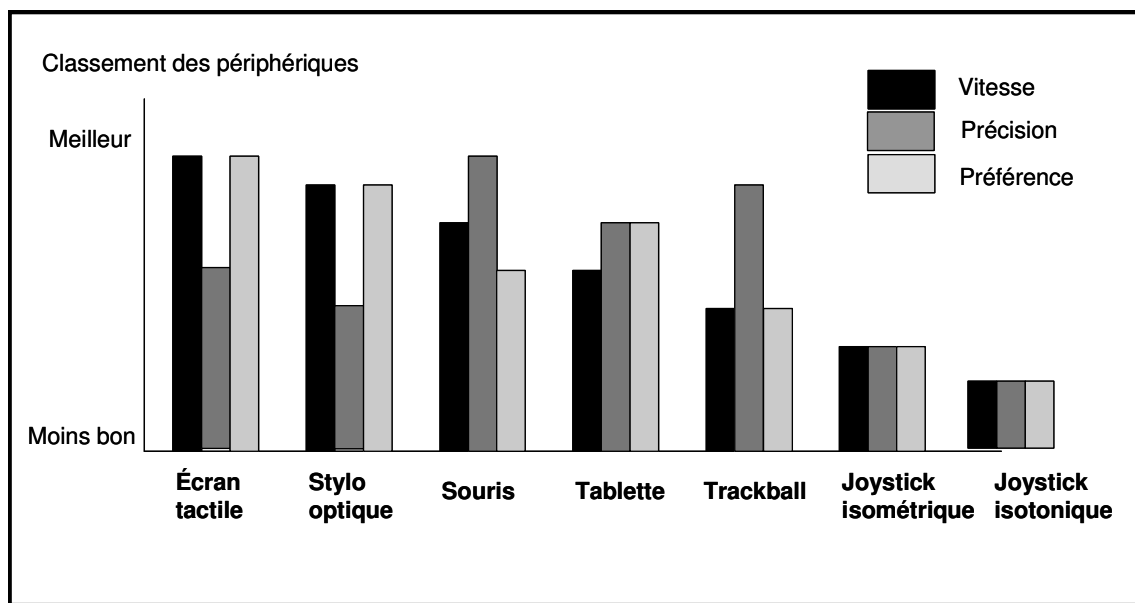


Fig. 3.13 Classification des dispositifs de pointé par Baber [BAB97].

Quatre périphériques retiennent notre intérêt à partir des résultats de Baber: la souris, la tablette graphique, l'écran tactile et le stylo optique. La tablette graphique est composée par un stylet et une surface sensitive qui repose sur un support horizontal. Le stylet qui lui est associé sollicite les groupements musculaires des doigts qui permettent la réalisation de

mouvement extrêmement fins. La tablette écran de type WACOM CINTIQ⁹ est à la fois des périphériques d'entrée et de sortie qui regroupent les avantages d'un écran tactile et d'un stylo optique. Il s'agit d'un écran LCD prévu pour une interaction directe précise via un stylet. En tant que périphérique direct, un nombre plus restreint d'étapes pour la coordination perceptuomotrices sont effectuées par rapport à la souris ou à la tablette. La fatigue propre aux périphériques directs peut être limitée en inclinant l'écran en position horizontale. Ce dispositif est à l'heure actuelle à l'étude auprès des experts de TOTAL. Nous avons mené une étude comparative entre souris, tablette, pointeur 3D et oculomètre pour l'accomplissement d'une tâche de sélection trajectorielle dans [SAL03]. La souris et la tablette ont donné les résultats les plus convaincants en terme de précision et de vitesse.

En résumé, la souris semble être l'outil le plus polyvalent pour contrôler l'exploration au travers de différentes primitives de contrôle. Pour réaliser la sélection durant la tâche segmentation, dans le cas du PDM, elle peut être associée au clavier et à une souris 3D pour réguler la vitesse et le sens de l'animation. Les sélections trajectorielles que sollicitent les techniques de pointé dynamique rendent tout de même son utilisation moins aisée qu'une tablette écran ou graphique. Le tableau de la figure 3.14 résume les choix que nous avons retenus. Un indice de qualité (bon, moyen, faible) indique l'adéquation du périphérique avec une technique particulière selon notre propre expertise et nos investigations auprès des utilisateurs. Nous n'avons volontairement pas inclus la cubic mouse, le périphérique de Hinckley et le CAT qui ne sont pas adaptés à notre contexte opérationnel.

	Souris 2D	Souris 3D	Tablette graphique	Tablette écran
Exploration Adaptative	Bon	Bon	Faible	Faible
Sélection PDA	Moyen	Faible	Bon	Bon
Défilement par PDA	-	-	-	-
Sélection PDM	Moyen	Faible	Bon	Bon
Défilement PDM	Bon	Bon	Faible	Faible

Fig. 3.14 Pertinence des périphériques pour le contrôle du PDA et du PDM.

⁹ <http://www.wacom.com/lcdtablets/index.cfm>

3.6 Synthèse

Ce chapitre a permis de proposer de toutes nouvelles techniques d'interaction pour la détection supervisée dans une vue 3D. Ces propositions semblent être une bonne opportunité pour faciliter l'utilisation des nouveaux modes de visualisation présentés dans la chapitre précédent afin d'inciter les utilisateurs à accepter pleinement les innovations apportées par la 3D. Les deux techniques de pointé dynamique automatique et manuel pour la segmentation manuelle offrent un cadre optimal permettant de faire défiler l'intégralité des sections et générer efficacement un nuage de points. La figure (3.15) résume les différentes combinaisons de tâches de sélection et de défilement qu'il était possible d'envisager ainsi que les solutions particulières que nous avons pu étudier. Comme cette figure le montre, d'autres techniques pourraient être mises en place. Cependant, elles n'apporteraient pas un avantage significatif par rapport aux solutions retenues.

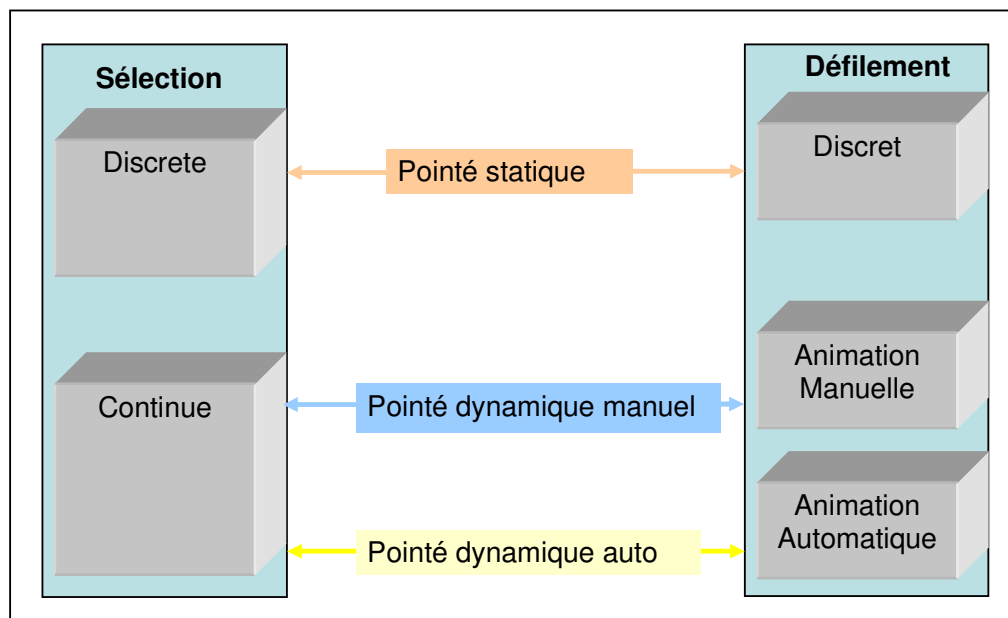


Fig. 3.15 Tâches d'interaction pour la segmentation manuelle et techniques d'interaction.

Les périphériques que nous avons choisi pour contrôler ces techniques (souris 2D, souris 3D, tablettes) semblent pertinents d'un point de vue d'un contexte industriel. En effet, outre leurs coûts réduits, ils sont incorporables dans un environnement de travail standard et tiennent compte des aspirations de nos utilisateurs pour l'accomplissement de leurs tâches. Les précédents chapitres ont permis de présenter les différents points constituant l'apport de

notre travail dans le contexte de la détection supervisée et plus particulièrement de la segmentation manuelle de faille. Le chapitre qui suit est consacré à la présentation des différentes expériences que nous avons menées afin de valider et d'évaluer les techniques proposées tant du point de vue de la visualisation que de l'interaction.

Chapitre 4

Evaluation empirique

L'enjeu de ce dernier chapitre est de valider, par la méthode expérimentale, différentes propositions et hypothèses que nous avons formulés tout au long de ce manuscrit. En effet, même si nous avons élaboré des techniques de visualisation et d'interaction en appliquant des règles strictes qui tiennent compte de la spécificité des utilisateurs, des tâches et du contexte opérationnel, il apparaît indispensable de vérifier empiriquement la validité des solutions retenues. En nous basant sur des outils méthodologiques issus de la psychologie expérimentale, différents protocoles ont pu être élaborés afin de mesurer et comparer les solutions envisagées. A chaque fois qu'un test statistique paramétrique a été appliqué, nous avons vérifié que chaque population obtenue respectait bien une distribution normale et que les variances des traitements étaient bien homogènes.

- La première expérience a pour objectif de quantifier l'apport de l'animation pour la localisation des failles à l'aide de la théorie de la détection du signal. A partir d'un signal statique noyé au sein d'un environnement bruité dynamique, nous avons estimé la sensibilité du système visuel en fonction de la vitesse d'animation.
- La deuxième expérience consiste en une étude qualitative des trois techniques d'interaction (PS, PDA, PDM) menées auprès des interpréteurs dans leur environnement de travail qui démontre le gain de temps obtenu par les méthodes dynamiques par rapport au statique.
- La troisième étude est une comparaison de ces mêmes techniques à partir de métriques spécialement élaborées pour quantifier la pertinence d'un pointé selon des critères de précision et de complétude.
- La quatrième expérience est destinée à mettre en évidence l'influence d'une visualisation par coupe projective sur les performances obtenues durant la tâche de segmentation par PDA.

- La dernière expérience est une évaluation quantitative de la souris et de la tablette graphique dans l'accomplissement d'un pointé dynamique d'une surface synthétique.

4.1 Influence de l'animation pour la localisation

4.1.1 Psychophysique et théorie de la détection du signal

La psychophysique est un pan de la psychologie qui étudie par l'expérimentation les relations entre les caractéristiques des stimulations et les sensations. Les méthodes expérimentales de mesure peuvent se décomposer en deux catégories. Premièrement, les mesures de temps de réaction pour lesquelles la durée écoulée entre la présentation du stimulus et la réponse motrice produite est calculée. Deuxièmement, les mesures psychophysiques qui ont pour objectif de quantifier la sensibilité de notre système visuel. Cette estimation d'un seuil de détection est menée en cherchant l'intensité qui permet de détecter la présence d'un signal au sein d'une stimulation donnée. La théorie de détection du signal (TDS) est un outil couramment utilisé en psychophysique depuis les années 50 pour analyser la prise de décision humaine en présence d'incertitudes. De nombreux psychologues ont eu recours à cette méthode dans des problématiques aussi diverses que la détection de tumeurs cancéreuses par des médecins, le verdict de culpabilité prononcé par un jury lors d'un procès, la recherche d'objets à l'aide de rayons X par des agents de sécurité... Cette technique largement inspirée par la théorie de l'information de Shannon [SHA48] est applicable lorsqu'un opérateur humain doit déterminer la présence d'un signal spécifique à partir d'un stimulus transporté par les processus visuels ou auditifs. Le modèle de la TDS décompose la prise de décision en deux étapes successives. Premièrement, l'énergie physique du stimulus est transformée par des processus sensoriels pour aboutir à une représentation interne au niveau neuronal. Deuxièmement à partir de cette représentation interne des processus décisionnels de hauts niveaux définissent la réponse à donner sur la présence ou l'absence du signal [MAC05].

A l'aide de la TDS, il est donc possible de mesurer deux paramètres liés à la prise de décision: la sensibilité au niveau de la réponse interne (d') et le critère de décision propre aux processus décisionnels (figure 4.1). La réponse interne est liée à l'activité neuronale du sujet engendrée par un stimulus entrant. Cette réponse est modélisée par deux fonctions gaussiennes distinctes (figure 4.1).

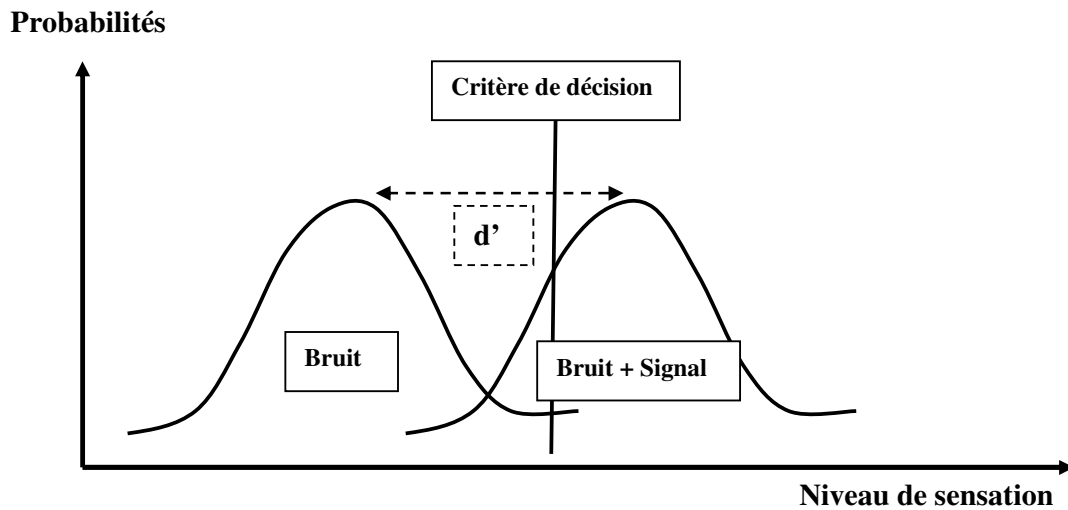


Fig. 4.1 Exemple de réponse interne en fonctions des deux distributions possibles.

Chacune des fonctions de la figure 4.1 représente respectivement la densité de probabilité lorsque le signal est absent (bruit seul) et présent (signal plus bruit). La mesure de l'indice de sensibilité d' est basée sur la distance des moyennes de ces distributions. Cette mesure renseigne sur la facilité de discriminer le signal du bruit. Plus les distributions sont voisines avec un recouvrement important et plus le signal est difficile à distinguer du bruit. En fonction de l'intensité de la réponse interne l'opérateur humain va pouvoir statuer sur la présence ou l'absence du signal. Cette réponse dépend d'un critère de décision lié à la stratégie mise en place par le sujet qui est dépendante de paramètres internes et externes : niveau de connaissance, charge de travail, contexte social et environnemental... Ce critère de décision va permettre de diviser la réponse interne en quatre parties distinctes (détection correcte, omission, fausse alarme, rejet correct). Si ce critère est bas, l'opérateur aura plus souvent tendance à répondre par des affirmations et donc à augmenter à la fois les détections correctes et les fausses alarmes.

La méthode traditionnelle utilisée en TDS est celle du simple choix, qui consiste à présenter un stimulus pour lequel le sujet devra dire si oui ou non un signal particulier est présent. Pour chaque modalité du stimulus (signal présent ou absent), le sujet doit obligatoirement répondre par l'affirmative ou la négative. Au final, on obtient un score moyen pour un certain nombre d'essais dans chacune des quatre configurations possibles.

	Réponse positive	Réponse négative
Signal présent	Détection correcte (DC)	Omission (O)
Signal absent	Fausse alarme (FA)	Rejet correct (RC)

Fig. 4.2 Configurations pour le simple choix.

La méthode du choix forcé à double alternative (2 AFC Alternative Forced Choice) est une variante du simple choix qui mesure la performance de détection indépendamment de tout critère de décision. Pour chaque essai, un même stimulus est affiché deux fois consécutivement, le signal étant présent uniquement dans un seul des deux cas. Un pourcentage de bonnes réponses sur l'ensemble des essais réalisés est ainsi obtenu pour chaque intensité du signal. Cette méthode revient à étudier un utilisateur possédant un critère de décision non biaisé. Pour estimer l'indice de sensibilité, il est nécessaire de déterminer un z-score (z) à partir d'une distribution normale inverse de moyenne 0 et d'écart type de 1.

A partir des z-score obtenus, il est alors possible de calculer d' en mesurant la sensibilité à l'aide de la formule (1).

$$(1) : d' = \frac{1}{\sqrt{2}} z(DC) - z(FA)$$

Afin d'estimer un seuil de détection et de faciliter l'analyse visuelle des résultats, une fonction psychométrique est généralement calculée. Cette fonction est calculée analytiquement à partir d'une régression logistique (2).

$$(2) : \text{Logit}(DC) = \ln(DC/(1 - DC))$$

L'estimation des paramètres est effectuée à partir des moindres carrés. Le calcul de la probabilité réelle est faite à l'aide transformation logistique inverse (3).

$$(3) : \text{InvLogit}(\text{Logit}(DC)) = \exp(\text{Logit}(DC))/(1 + \exp(\text{Logit}(DC)))$$

4.1.2 Protocole expérimental

Comme nous l'avons évoqué au chapitre deux, notre système visuel est particulièrement adapté aux traitements de mouvements complexes et variés. L'animation des données sismiques à la manière d'une séquence vidéo semble être un moyen efficace de faciliter à la fois la localisation des failles et le parcours rapide d'un volume sismique. Afin de valider notre hypothèse selon laquelle l'animation facilite la détection de contour, une expérience psychophysique a été effectuée en se basant sur la théorie de détection de signal.

Le stimulus à détecter est un segment d'intensité 100 en niveau de gris inclus par combinaison additive dans un bloc de bruit blanc dynamique. Ce segment, de 50 pixels de longueur et 2 pixels de largeur, est situé au sein d'une succession d'images de taille 500x500 pixels. La position et l'orientation du segment est aléatoire et varie à chaque essai, afin que notre tâche ne soit pas liée à un facteur d'expectative (réduisant le temps de traitement visuel) mais plutôt à un processus de saillance visuelle. Le segment est localisé sur une couronne constituée par deux cercles de rayon respectifs de 50 et 100 pixels. La valeur du rayon externe est liée au concept de l'UFOV (Useful field of view), défini comme une aire circulaire autour d'un point de fixation dans laquelle une information nécessaire à une tâche peut être extraite sans recherche visuelle [WIC04].

Des blocs de bruits blancs gaussiens ont été présentés aux sujets à une vitesse spécifique d'animation (par pas de deux de 0 à 18 images par seconde). L'expérience est volontairement limitée aux mécanismes de la vision pré-attentive, en présentant le stimulus sur une durée réduite (500 ms), pour éviter que les sujets entreprennent une recherche visuelle approfondie de l'image.

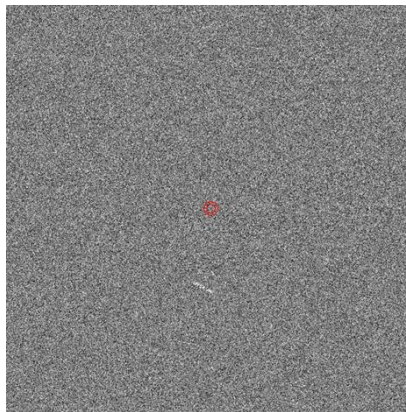


Fig. 4.3 Une image d'un bloc bruité avec le segment à détecter et le point de focus.

Le protocole est défini selon la méthode de double choix alternatif forcé (2AFC). Pour chaque essai, un bloc bruit est affiché séquentiellement deux fois : une fois pour chaque condition. Une condition correspond à la présence ou à l'absence du signal. Au début de chaque condition, le sujet est invité à concentrer son attention sur une cible rouge située au centre de l'image correspondant au point de focus. À la fin de chaque essai, le sujet indique dans quel bloc est contenue le signal. La durée des étapes de chacun des essais est présentée dans la figure 4.4.

L'ordre des essais et des conditions est aléatoire afin d'éviter un effet d'apprentissage. L'expérience a impliqué 20 sujets à qui ont été présentés 20 essais pour chaque niveau de bruit. La variable indépendante de l'expérience est la vitesse d'animation, qui est composée de dix modalités (1 à 18 images par secondes). Les variables dépendantes sont le pourcentage de réponses correctes et l'indice de sensibilité visuelle d' .

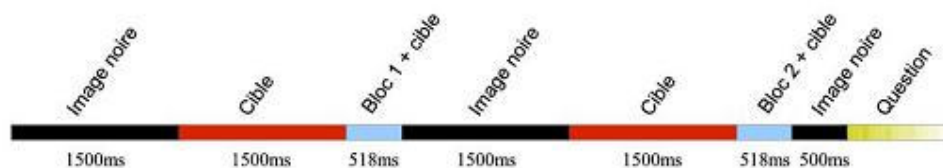


Fig. 4.4 Déroulement d'un essai.

Les sujets recrutés pour cette expérience sont des étudiants et des enseignants du laboratoire LAPS de l'Université Bordeaux 1. Ils furent tous volontaires et n'eurent aucune rémunération. Nous avons sollicité 20 sujets (14 hommes et 6 femmes) avec une moyenne d'âge de 28,8 ans. L'environnement mis en place pour notre expérience est composé d'un écran 22 pouces MITSUBISHI Diamond pro 2070 avec une résolution 1280 * 960 pixels. L'ordinateur utilisé est un PENTIUM IV 3 GHZ avec 2 GHZ de mémoire vive et une carte graphique NVIDIA GeForce 6800 GT. L'expérimentation, dont le déroulement est totalement automatisé, a été implémentée sous Matlab 6.5 avec la bibliothèque Psychtoolbox 2.54¹⁰.

¹⁰ <http://www.psychtoolbox.org/>

4.1.3 Résultats

Le calcul de la moyenne de l'indice de sensibilité valide l'hypothèse selon laquelle la sensibilité aux stimuli considérés du système visuel est accrue quand la vitesse d'animation augmente. On obtient une sensibilité maximale pour une vitesse de 16 images par seconde et une sensibilité minimale pour une vitesse de 2 images par secondes. On peut noter une inversion de cette augmentation au niveau de la vitesse 18, qui illustre une tendance asymptotique de nos résultats caractérisant la fonction psychométrique (figure 4.5). En tout état de cause, cet accroissement de l'indice de sensibilité (de 0,59 à 2,43) illustre parfaitement l'effet positif de l'animation sur la réponse interne des sujets.

Vitesse (image/s)	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18
d'	0,59	0,48	0,8	1,41	1,74	1,5	1,99	2,36	2,74	2,43

Fig. 4.5 Indice de sensibilité d' et vitesse d'animation.

Le taux de détections correctes en fonction de la vitesse d'animation est présenté dans la figure 4.6 avec les barres qui représentent les écarts types. Le taux de bonnes réponses est de 65 % en condition statique mais de 96.5% avec une vitesse de 16 images par seconde. Cette augmentation relativement importante (environ 30 %) confirme bien l'effet positif de l'animation pour la détection d'un signal. La courbe noire, de la figure 4.6, est la fonction psychométrique obtenue par une régression logistique. Nous remarquons que pour un seuil de 90% de bonnes réponses, la vitesse est de 12 images par seconde. Ce résultat est concordant par rapport aux vitesses qu'adoptent généralement les interpréteurs pour animer une donnée sismique (8 à 12 images par secondes). En effet, au-delà d'une certaine vitesse, il semblerait que l'effet de l'animation reste stable. Nous n'observons pas sur la courbe modélisée une perte de performance qui pourrait être engendrée par une vitesse trop élevée.

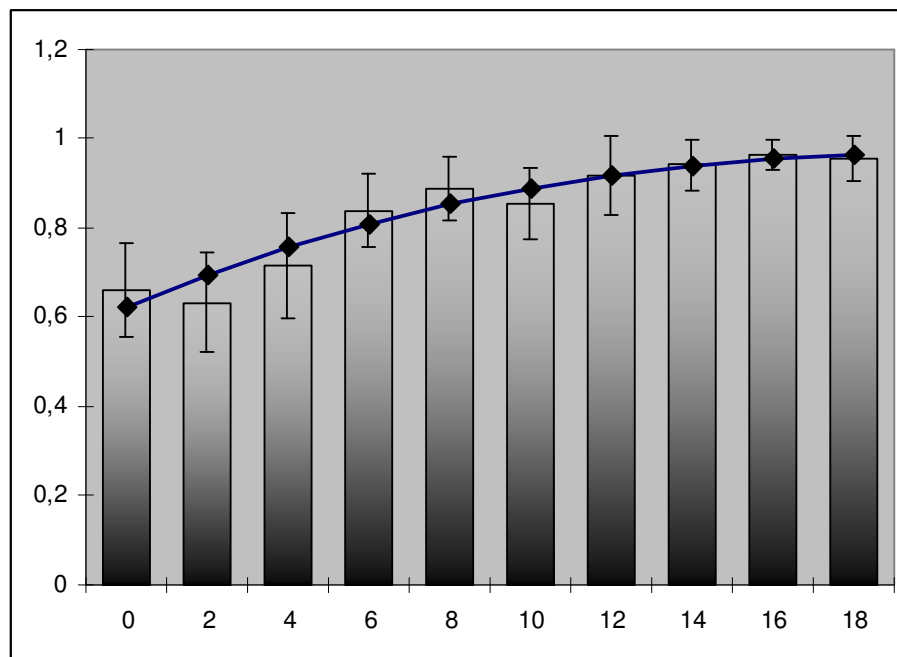


Fig. 4.6 Pourcentages de bonnes réponses et fonction psychométrique.

Cette expérience fût réalisée au moyen de blocs artificiels, dont les textures aléatoires sont relativement différentes de celles rencontrées dans les données sismiques. Pourtant, ces résultats s'avèrent relativement intéressants, du fait de leur correspondance par rapport aux observations menées en situation opérationnelle sur l'animation lors d'un pointé de failles. Elle nous renforce dans le choix d'animer les sections afin d'améliorer les performances des utilisateurs dans la localisation des failles. De plus, elle corrobore notre hypothèse selon laquelle le mouvement du fond facilite l'extraction d'un signal statique. C'est exactement ce phénomène qui se produit lorsque les sections sont animées le long d'un chemin congruent à une faille lors d'un pointé dynamique. De plus en élargissant notre expérience au domaine de l'animation cinématographique, on peut s'apercevoir que nos résultats corroborent le minimum requis pour percevoir une animation fluide qui est de 12 images/seconde (le standard est de 24 images/seconde) induit par le phénomène de persistance rétinienne.

4.2 Evaluation qualitative des techniques de pointé

Cette expérience a consisté à évaluer le niveau d'acceptabilité des techniques de segmentation manuelle au niveau du logiciel d'interprétation utilisé par les géologues. Il est apparu en effet indispensable de mener une évaluation directement sur le « terrain » auprès des utilisateurs concernés par nos propositions. Les trois techniques de segmentation : pointé statique (PS), pointé dynamique automatique (PDA) et pointé dynamique manuel (PDM) sont disponibles dans le logiciel SISIMAGE¹¹. Il a été demandé à différents interpréteurs de segmenter manuellement une faille réelle au moyen de chacune de ces techniques. A l'aide de questionnaires, nous avons pu guider les experts vers une autoévaluation de leurs résultats, mesurer les temps de segmentation et estimer la charge de travail impliquée dans cette activité. De plus, cette étude, outre les échanges fructueux d'idées avec les utilisateurs rencontrés, a été pour nous une opportunité de compléter et valider les méthodes de travail présentées dans le chapitre premier et d'impliquer plus profondément les experts dans nos recherches.

4.2.1 Evaluation subjective et charge de travail

Depuis les années 70, la charge de travail (workload) est un concept largement utilisé en facteur humain pour l'évaluation de différents systèmes où l'effort mental de l'opérateur présente un aspect critique (contrôle aérien, pilotage d'un avion...). La charge de travail est définie comme le ratio entre les ressources mentales nécessaires pour effectuer une tâche sur un système et celles que peut mobiliser un opérateur humain.

Les ressources disponibles sont variables selon les individus et leur facilité d'allocation est largement dépendante du niveau d'expertise et des compétences individuelles. Plus la charge de travail est élevée et plus la tâche exécutée sur un système va être pénible, complexe, stressante et fatigante (figure 4.7). Lorsque la tâche doit être menée dans un laps de temps limité, la charge de travail se réfère principalement au ratio entre le temps nécessaire pour mener cette tâche à son terme et le temps imparti pour le faire. La réalisation de plusieurs tâches en parallèle peut engendrer une fragmentation des ressources attentionnelles et s'avère préjudiciable pour la tâche principale comme l'illustre la théorie des ressources de Kahneman [KAH73].

¹¹ SISIMAGE est la plateforme d'interprétation développée par les équipes de R&D du groupe TOTAL. Cette plateforme est implantée dans une centaine de filiale du groupe dans le monde.

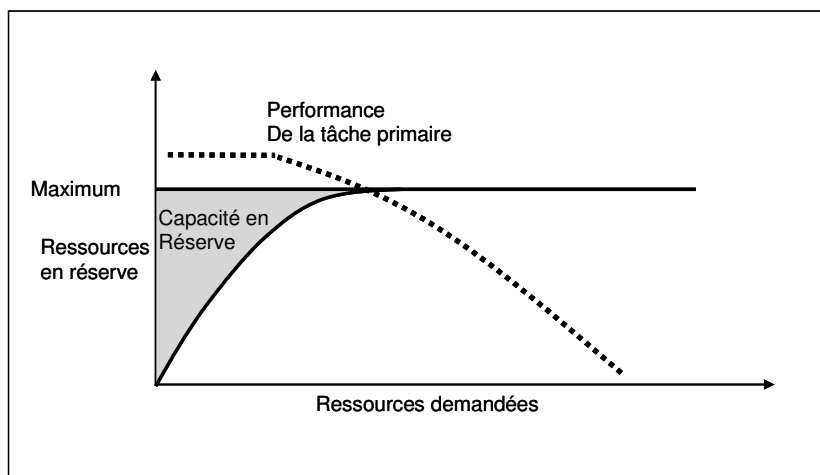


Fig. 4.7 Variations de la charge de travail selon Wickens.

La mesure de la charge de travail est réalisée au moyen de trois catégories d'évaluateurs : les tâches secondaires, les mesures physiologiques et les mesures subjectives [WIC99][WIC04].

Les tâches secondaires : en ajoutant une tâche concurrente à une tâche primaire, il est possible de mesurer la charge de travail. Les sujets doivent se focaliser sur l'accomplissement de la tâche primaire, les ressources restantes sont allouées à la tâche secondaire dont les performances ont été indépendamment mesurées. Des exemples de tâches secondaires peuvent être des exercices de mémorisation, des calculs arithmétiques ou des mesures de temps de réaction à un stimulus particulier. Le désavantage de cette méthode est d'introduire une tâche souvent artificielle par rapport au contexte étudié.

Les mesures physiologiques : trois grandes catégories d'indicateurs physiologiques sont généralement utilisées [BOY03] les mesures oculaires, les mesures EEG (électro-encéphalographiques) et les mesures cardiaques. A l'aide de différents appareillages, il est possible de mesurer durant la réalisation de la tâche la régularité du rythme cardiaque, la dilatation de la pupille, le nombre de saccades oculaires, la fréquence de certaines ondes cérébrales. Toutes ces mesures sont le reflet de notre activité interne et présentent l'avantage d'une évaluation objective des variations de la charge de travail au cours du temps. Néanmoins, même si les appareillages nécessaires à cette évaluation psychophysique

sont de moins en moins invasifs, il n'en reste pas moins qu'ils peuvent avoir un réel impact sur la mesure en augmentant le stress du sujet et entraîner des biais expérimentaux.

Les mesures subjectives : au moyen de questionnaires et d'échelles de valeur, il est possible d'évaluer directement auprès des utilisateurs la charge de travail. Ces méthodes sont avantageuses du point de vue de la méthodologie expérimentale car elles n'interfèrent pas durant la réalisation de la tâche et s'avèrent relativement faciles à mettre en place. En revanche, elles restent dépendantes de la bonne (ou mauvaise) compréhension du questionnaire et par une sous-évaluation de l'effort ressenti par les sujets [BOY03]. Deux grandes techniques multidimensionnelles font depuis quelques années références dans le domaine de l'évaluation de la charge de travail : le NASA-TLX et le SWAT. On pourra trouver dans [RUB04] un comparatif de ces deux méthodes.

Le NASA Task Load index [HAR88] utilise six dimensions pour mesurer la charge de travail : la demande mentale, la demande physique, la demande temporelle, la performance, l'effort et la frustration (voir annexe pour une définition plus complète). Pour chacun de ces indices le sujet doit, une fois la tâche réalisée, choisir un score au sein d'une échelle de vingt valeurs (figure 4.8).

The image shows a software interface for a questionnaire. The title bar reads 'Questionnaire'. Below it, the text says 'Task Questionnaire - Part 1' and 'Click on each scale at the point that best indicates your experience of the task.' There are six scales, each with 20 tick marks. The scales are: 'Mental Demand' (Low to High), 'Physical Demand' (Low to High), 'Temporal Demand' (Low to High), 'Performance' (Good to Poor), 'Effort' (Low to High), and 'Frustration' (Low to High). Each scale has a black bar indicating a selected value. At the bottom, there are 'Cancel' and 'Continue' buttons.

Fig. 4.8 Partie 1 du questionnaire.

Pour chaque indice, le score global obtenu allant de 0 à 100 est pondéré lors d'une seconde étape. Le sujet compare les indices deux à deux (15 comparaisons au total) pour choisir à chaque proposition l'indice qui semble le plus contribuer à la charge de travail (figure 4.9).

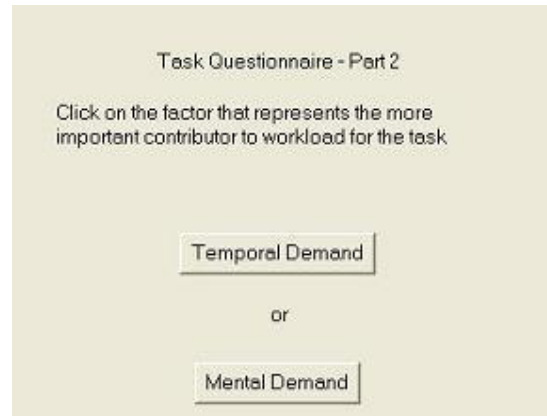


Fig. 4.9 Partie 2 du questionnaire.

La moyenne globale des indices aboutit à la valeur finale de la charge de travail. Plus cette valeur sera élevée et plus la tâche sera considérée comme coûteuse.

4.2.2 Protocole expérimental

Nous avons choisi, avec l'aide des experts, une faille spécifique au sein d'un bloc relativement peu bruité. L'objectif est de pointer la faille dans sa totalité au moyen de chacune des techniques d'interaction. Aucune limite de temps n'est imposée aux sujets, qui doivent déterminer par eux-mêmes si le nuage de points obtenu est suffisamment riche pour décrire la faille. Les coupes sismiques sont affichées soit dans la vue 2D (statique) ou 3D adaptative (dynamique). Elles sont orthogonales à un chemin identique prédéfini en *randomline*, centré le long de la faille retenue. Le chemin et la faille cible sont visualisés dans un deuxième écran contenant une section *timeslice* traitée par un attribut de cohérence. Une information contextuelle sur la localisation de la faille dans la donnée et de la coupe *randomline* affichée est ainsi fournie. Le pas de défilement retenu pour le PS est de 20 sections. Cette valeur nous a été conseillée par les experts en fonction des changements dans la géométrie de la faille cible choisi. La fréquence de défilement pour les techniques dynamiques est de 12 Hz (une image toutes les 80 ms).

Nous avons sollicité six sujets pour cette expérience, dont trois sont des experts en interprétation structurale et les trois autres travaillent dans le contexte de l'analyse et du traitement des images sismiques directement au contact des experts. Tous les sujets sont familiers avec l'outil logiciel SISMAGE version 2.1.1 ainsi qu'avec la technique de pointé statique.

Pour se placer dans les conditions d'utilisation standard le pointé statique est effectué au moyen de la souris. Pour les deux autres techniques dynamiques, nous avons utilisé une tablette/écran CINTIQ de WACOM.

4.2.3 Variables étudiées

La variable indépendante (vi) analysée dans cette expérience est la technique d'interaction, qui se décompose en trois modalités :

- Le pointé statique effectué avec la souris (PS).
- Le pointé dynamique manuel avec le clavier et la tablette écran (PDM).
- Le pointé dynamique automatique avec la tablette écran (PDA).

Les Variables dépendantes (vd) retenues pour comparer les techniques sont :

- la durée de pointé : nous avons mesuré pour chacune des techniques le temps nécessaire à la segmentation de l'ensemble de la faille. Les sujets ont volontairement été soustraits à toute contrainte temporelle. Le temps écoulé ne leur a pas été mentionné pour ne pas les placer en situation de stress.
- la charge de travail : nous avons utilisé l'exécutable NASA-TLX du US Naval Research Laboratory¹² qui fournit une interface graphique pour le questionnaire et calcul automatiquement les scores.
- la précision : a posteriori, il a été demandé aux utilisateurs de visualiser le nuage de points obtenu et la surface reconstruite dans la vue 3D. Par rapport à différentes sections les experts ont dû estimer la qualité de leur pointé en terme de précision

¹² <http://www.nrl.navy.mil/aic/ide/NASATLX.php>

sur une échelle de 1 à 5. Un pointé précis doit être le plus proche possible de la position de la faille cible.

- la forme : comme pour la précision à l'aide d'une échelle de 1 à 5, les sujets ont dû estimer la bonne forme 3D de leur nuage de points. Un pointé bien formé doit respecter la géométrie structurale de la faille sans pour autant être précisément localisé sur la faille.

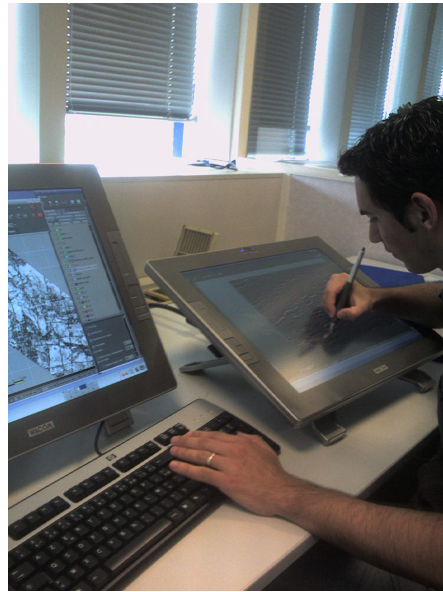


Fig. 4.10 Un sujet dans notre environnement expérimental.

4.2.4 Résultats

La durée moyenne de pointé de l'ensemble des sujets est de 17,7 minutes pour le PS, 5,5 minutes avec le PDM et 3,3 pour le PDA (figure 4.11). Ce résultat prouve que nos techniques dans un cadre opérationnel sont capables de réduire de 3 à 5 fois le temps nécessaire pour segmenter une faille. En multipliant ce résultat par les dizaines voire les centaines de failles qui existent dans un volume sismique, un gain de temps notable pour l'ensemble de la tâche de détection supervisée de failles est effectivement mis en lumière.

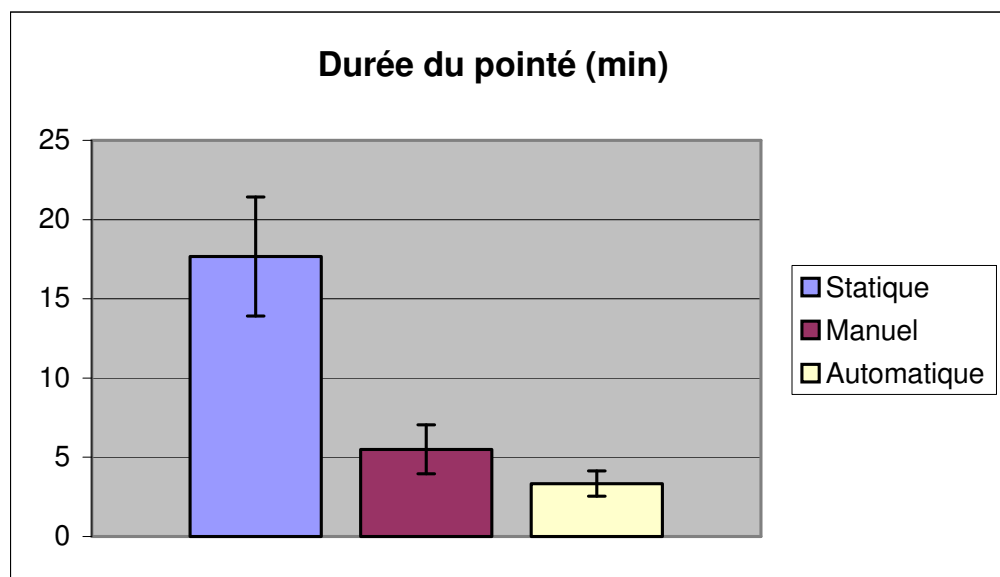


Fig. 4.11 Moyennes des durées pour les techniques de pointé.

En statique, la charge de travail mesurée est de 49,6 contre 42,2 pour la technique dynamique manuelle. Le pointé dynamique automatique engendre une charge de travail de 47. Ces résultats sont relativement proches et démontrent que nos deux nouvelles techniques n'engendrent pas une hausse de la charge de travail, bien au contraire. Ce résultat peut s'expliquer en étudiant plus précisément chacun des indices. Pour le PS, c'est surtout la performance et la frustration qui provoquent l'augmentation de la charge mentale. Selon nous, le défilement discret des sections en est la principale cause. En effet, outre le fait de devoir cliquer sur un bouton pour changer chaque section, les sujets analysent uniquement une petite partie du bloc. La perte de continuité entre chaque section a souvent engendré une perte de temps pour localiser à nouveau la faille cible (notamment pour les non géologues). Pour le PDA, le principal contributeur à la charge de travail est la demande temporelle. En effet les sujets ont ressenti un stress temporel en raison de l'animation automatique qui les contraint à subir la cadence imposée. En terme de charge de travail le PDM semble être la technique la moins coûteuse des trois et présentant le meilleur compromis au niveau des indices.

	Demande Mentale	Demande Physique	Demande Temporelle	Performance	Effort	Frustration
PS	47,5	32,5	35	54,1	38,3	40,83
PDM	50	36,67	31,67	42,5	37,5	25,83
PDA	46,67	38,33	40	41,67	40	35,83

Fig. 4.12 Moyennes des scores pour chaque dimension de la charge de travail.

Les sujets estiment avoir été plus précis avec le PS, ils ont obtenu un score moyen de 3,67 (sur 5) contre un score 3,17 (sur 5) en utilisant le PDM. Le PDA reste la méthode la moins avantageuse en terme de précision 2,83 (sur 5). Le caractère ouvert de la tâche de sélection rend particulièrement difficile l'ajustement du curseur par rapport à la faille cible.

Du point de vue de la forme du pointé, le PDM permet d'obtenir un meilleur nuage de point selon les sujets par rapport à la structuration géométrique de la faille, le score moyen obtenu est de 3,83 (sur 5). Les deux autres techniques arrivent à égalité avec 3,33 (sur 5).

Enfin, les sujets estiment le PDM comme la meilleure technique suivie par le PDA. Le PS utilisé historiquement pour le pointé de faille s'avère donc la technique la moins plébiscitée. Ces résultats ont été obtenus sur un nombre limité de sujets. Néanmoins les trois experts, rompus à l'exercice du PS, qui ont pris part à cette expérience estiment tous le PDM comme la meilleure solution et ont assuré souhaiter l'utiliser à l'avenir.

4.3 Evaluation quantitative des techniques de pointé

L'objectif de cette expérience est de comparer les trois techniques d'interaction pour la réalisation d'une tâche de segmentation manuelle d'une faille synthétique. Nos hypothèses pour cette expérience sont que le PDA engendre une répartition plus homogène du nuage de points par rapport au PS. En revanche, nous estimons que la précision du pointé sera plus importante en statique. Le PDM doit permettre d'obtenir des résultats qui se situent entre le PS et PDA en termes de répartition et de précision.

Pour mener cette expérience, une faille synthétique a été créée en décalant un volume sismique (350*325*370), le long d'une surface d'équation (4)

$$(4) f(x) = y/a * \cos(y/b) + G(z)$$

Avec les paramètres $a = 40$; $b = 60$;

Les valeurs de Z ont été définies au moyen d'une suite de nombres aléatoires convolués à une fonction gaussienne $G(Z)$ pour empêcher l'apprentissage des déplacements de l'intersection entre la surface et chaque section affichée. Durant l'animation, la faille se déplace avec une amplitude maximale de 47 pixels et une accélération de 0.83 pixel/s². Le choix de cette faille a été effectué afin que sa géométrie soit plausible du point de vue géologique (figure 4.13).

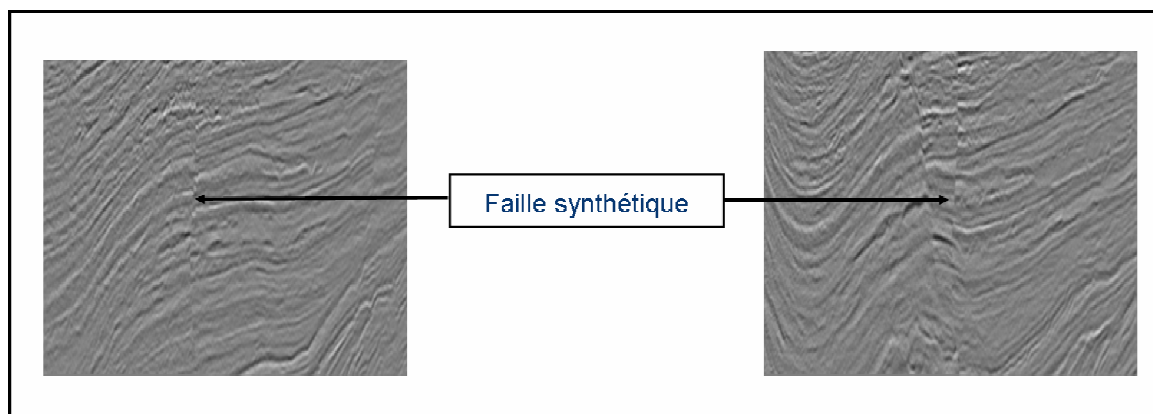


Fig. 4.13 Deux sections du bloc expérimental parcouru par la faille synthétique.

L'ensemble des techniques d'interaction sont implantées dans le logiciel SISMAGE. Le premier écran contient la fenêtre 2D ou 3D (selon la modalité) qui présente le volume en section *inline* sur lesquelles la sélection des points s'effectue. Un deuxième écran présente une section *timeslice* du bloc traité au moyen de l'attribut cohérence. Pour chaque essai, la première section est affichée avec cinq points localisés sur la faille afin d'indiquer aux utilisateurs la faille cible. Le pas de défilement retenu pour le PS est de 30 sections. La vitesse de défilement des sections en dynamique est de 12 Hz.

La consigne donnée au sujet est d'accomplir une sélection des points la plus précise possible en essayant de parcourir la totalité de la donnée. La tâche est réalisée en temps limité de deux minutes. Dans le cas du PS, les sujets ont pour consigne de marquer un maximum de cinq points sur chaque section, puis de charger la section suivante en cliquant sur le bouton de défilement. Pour le PDM, les sujets doivent se déplacer dans le bloc à l'aide des touches directionnelles du clavier et pointer la faille sur différentes sections. Pour le PDA, les sujets doivent marquer la faille une fois l'animation lancée. Pour les deux techniques dynamiques, les sujets sont invités à relâcher le bouton de la souris si le mouvement effectué n'est plus maîtrisé afin de réajuster leur curseur et de reprendre l'acquisition continue.

A la fin de l'expérience, les sujets doivent classer les techniques selon leur ordre de préférence. Un score allant de 1 (la technique la moins appréciée) à 3 (la technique la plus appréciée) est accordé en fonction de ce classement.

Douze sujets (9 hommes et 3 femmes) avec une moyenne d'âge de 31,3 ans, ont participé à cette expérience. Ils sont tous novices en terme de segmentation manuelle et ne sont pas géologues de formation. Les sujets utilisent quotidiennement la souris comme périphérique de pointé avec une moyenne de six heures par jour. Afin d'éviter des problèmes de latéralité, l'ensemble des sujets sont droitiers.

La souris a été retenue pour cette expérience car elle correspond au périphérique utilisé quotidiennement par les géologues dans le cadre de leur activité d'interprétation. Il s'agit d'une souris optique LOGITECH utilisée avec une fonction d'ordre 1 (vitesse). L'environnement expérimental est composé par deux écrans Mitsubishi Diamond 2070 (22 pouces avec une résolution de 1280 * 1024 pixels). L'ordinateur est un pentium IV 3 Ghz avec 2 Go de Ram et une carte graphique GeForce 6800 GT avec 256 Mo de mémoire. Le

système d'exploitation est un linux sous la distribution Mandriva avec la version 2.1.1 du logiciel SISIMAGE.

4.3.2 Variables étudiées

La variable indépendante évaluée au cours de cette expérience est la technique d'interaction composée de trois modalités : pointé statique (PS), pointé dynamique manuel (PDM), pointé dynamique automatique (PDA). L'ordre des modalités est déterminé aléatoirement par la méthode de contrebalancement en carré latin¹³. Chacune des trois techniques a été utilisée trois fois par les sujets. Le premier essai sert d'apprentissage afin de familiariser les sujets à la technique utilisée. Les deux autres sont enregistrés pour effectuer les mesures (position x, y, t des points d'acquisition).

Le but de cette expérience est de comparer les trois techniques à l'aide de métriques qui reflètent la qualité d'un pointé. Du point de vue des interpréteurs, un pointé est valide si le nuage de points obtenu combine à la fois des critères de précision et de complétude. Pour être précis, ce nuage de points doit se situer à la distance la plus faible possible du plan de faille. Pour être complet, les points doivent être disposés régulièrement sur la surface.

4.3.2.1 Précision

La précision est estimée en calculant pour chaque point d'acquisition sa distance euclidienne par rapport au point orthogonal situé sur la faille dans le plan t (figure 4.14). La moyenne de ces distances est évaluée pour établir la métrique de précision.

$$(5)D = \sqrt{(xp - xc)^2 + (yp - yc)^2}$$

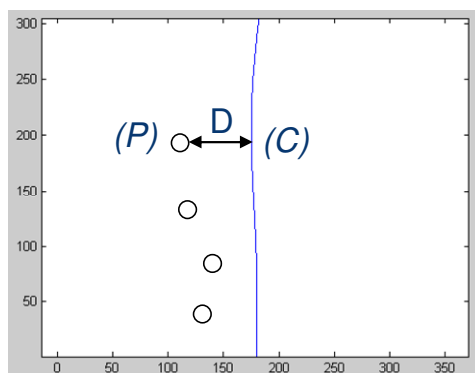


Fig. 4.14 distance orthogonale.

¹³ carré latin : matrice carrée dont chaque ligne et chaque colonne ne contiennent qu'une seule fois la même suite de valeur.

4.3.2.2 Complétude

La complétude est une métrique mise en place dans le but de quantifier la répartition des points sur la faille. Pour calculer cette métrique l'ensemble des points générés par les sujets sont dans un premier temps projetés verticalement sur le plan (Y, T). L'image est ensuite binarisée puis traitée au moyen d'un algorithme de fast marching [SET96] afin d'obtenir une carte de distance. Ce calcul a été réalisé sous la toolbox Matlab de fast marching¹⁴ qui permet de construire des cartes de distance isotropes. La moyenne de l'histogramme des valeurs des pixels de la carte de distance sert comme indice de complétude. Une valeur faible de la complétude indiquera une répartition homogène du nuage de points. Le schéma ci-dessous est une simulation qui illustre les différentes étapes du calcul de la complétude. La première simulation est basée sur un ensemble de points obtenus en plaçant aléatoirement un point sur chaque image. La moyenne calculée pour la carte de distance est de 9,45 pixels. Une deuxième simulation a été menée avec 5 points par coupes et donne un résultat de 4,14 pixels.

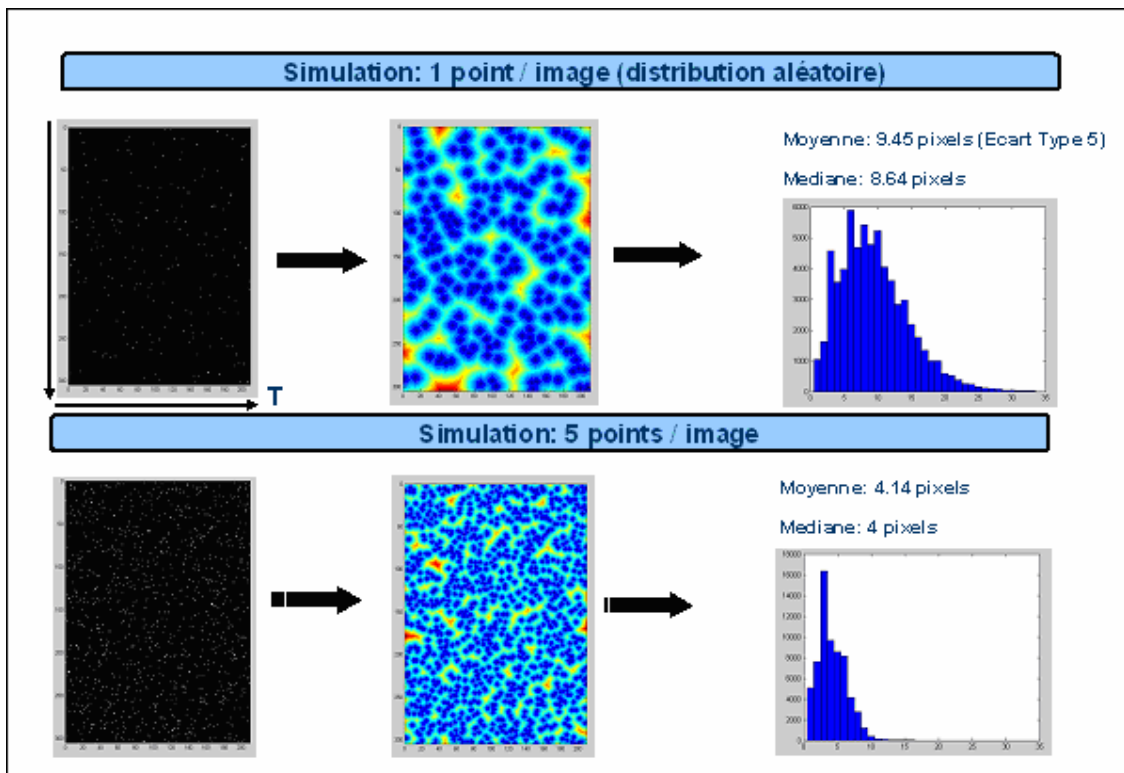


Fig. 4.15 Simulations et différentes étapes de la complétude.

¹⁴ <http://www.cmap.polytechnique.fr/~peyre/>

4.3.3 Résultats

4.3.3.1 Précision

Afin d'étudier les performances des sujets en terme de précision, une analyse de variance (ANOVA) à un seul facteur (technique d'interaction) a été calculée. Son résultat $F[10,2] = 15,9$; $p < 0,05$ indique un effet de la technique d'interaction qui nous permet d'aller plus avant dans notre comparaison des moyennes. Afin d'analyser les moyennes des distances, un t-test a été utilisé pour comparer chacune des paires. Comme le montre le tableau ci-dessous, tous les résultats obtenus pour ce test statistique sur la précision sont significatifs.

Fig. 4.16 t-test Précision	Fig. 4.17 Comparaison PS-PDM	Fig. 4.18 Comparaison PS-PDA	Fig. 4.19 Comparaison PDM-PDA
Fig. 4.20	Fig. 4.21 $T(11) = -2,478$; $p < 0,05$	Fig. 4.22 $T(11) = -4,706$; $p < 0,05$	Fig. 4.23 $T(11) = -4,355$; $p < 0,05$

Comme nous l'avons envisagé dans nos hypothèses de départ, les sujets ont été plus précis avec le PS. Les résultats montrent une distance moyenne de 2,31 pixels. Le PDA est la moins précise avec 3,07 pixels. La moyenne obtenue pour le PDM est de 2,62 pixels. On peut supposer que le résultat obtenu avec le PDA est imputable à la sélection trajectorielle et au caractère non prédictible de l'environnement. En effet, pour un même type de mouvement mais dans un environnement statique les sujets sont plus précis comme le montre les résultats du PDM. On note que l'écart entre le PS et le PDM est de moins de 1 pixel en moyenne. Ce résultat replacé à l'échelle de la réalité terrain pour une résolution pour le bloc utilisé de 12,5 m/pixel) donne une différence de précision de l'ordre d'une dizaine de mètres.

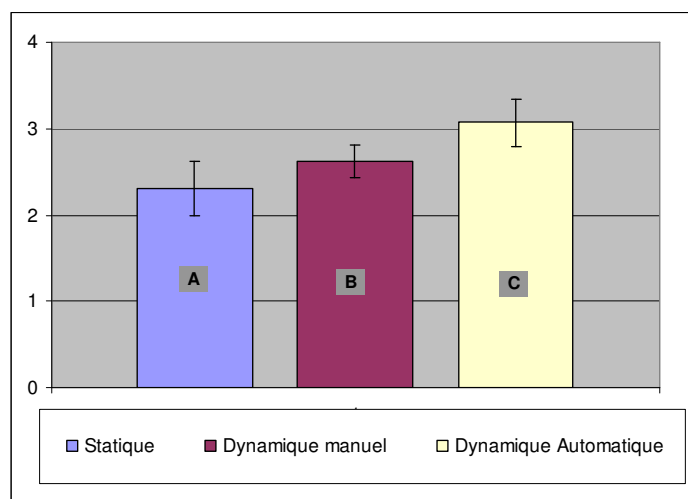


Fig. 4.24 Moyenne des précisions pour les techniques de pointé.

4.3.3.2 Complétude

Pour la complétude, l'ANOVA appliquée nous donne aussi un résultat significatif $F[10,2] = 5,9$; $p < 0,005$. Les calculs des t-tests pour toutes les paires de modalité donnent un résultat significatif pour uniquement deux paires (PS, PDM) et (PS, PDA). Nous ne pourrions donc conclure sur la prédominance d'une technique dynamique sur l'autre en terme de complétude.

Fig. 4.25 t-test Complétude	Fig. 4.26 Comparaison PS-PDM	Fig. 4.27 Comparaison PS-PDA	Fig. 4.28 Comparaison PDM-PDA
Fig. 4.29	Fig. 4.30 $T(11) = 13,350$; $p < 0,05$	Fig. 4.31 $T(11) = 21,565$; $p < 0,05$	Fig. 4.32 $T(11) = 1,202$; $p = 0.255$

Le PS obtient une valeur de complétude moyenne de 15,3 pixels. Cette technique ne permet d'obtenir une répartition des points beaucoup moins homogène que le PDM et le PDA dont les moyennes sont respectivement de 7,2 pixels et 6,6 pixels. Comme prévu, le faible nombre de points, qu'autorise le PS, induit une bande passante beaucoup plus réduite. La sélection continue des techniques dynamiques augmente cette bande passante et autorise un meilleur échantillonnage des points le long du plan de faille.

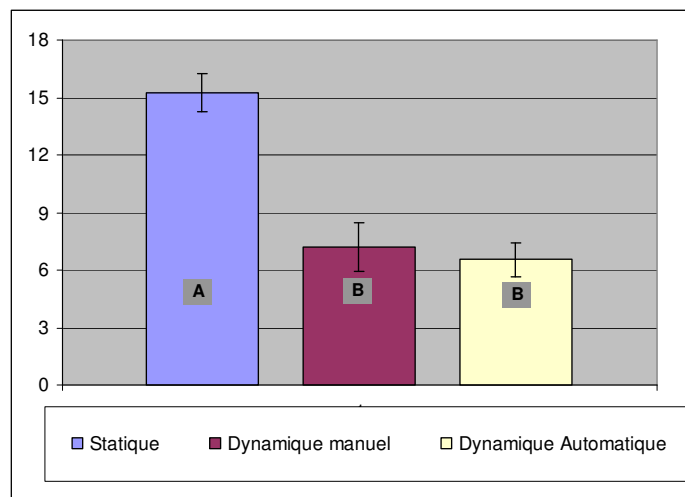


Fig. 4.33 Moyenne des complétudes pour les techniques de pointé.

Ces résultats sont donc cohérents par rapport à nos hypothèses et renforcent la pertinence des résultats obtenus auprès des experts dans l'expérience précédente. Au niveau de l'évaluation subjective menée en fin d'expérience, les sujets plébiscitent majoritairement le PDA avec 28 points sur 36 possibles contre 24 points pour le PDM et 18 points pour le PS. Les sujets ont dans l'ensemble trouvé la méthode automatique la meilleure, loin devant le PS considéré comme la technique la plus fastidieuse. Nous avons pu observer durant l'expérimentation du PS, la difficulté pour de nombreux sujets, de conserver en point de mire la faille cible. Quelques sujets, en raison du défilement discret ont même marqué la mauvaise faille sur certaines sections sans jamais s'en apercevoir. La continuité du défilement imposé par les deux autres techniques a permis d'éviter cet écueil. Les techniques dynamiques permettent d'obtenir un pointé plus riche tout en engendrant une perte de précision réduite.

4.4 Evaluation de la coupe projective

Le but de cette expérimentation est de comparer les performances des utilisateurs pour un pointé dynamique de surface synthétique réalisé avec et sans une visualisation par coupe projective. Pour établir une référence et quantifier l'apport de notre technique de visualisation une condition statique est étudiée. Une première expérience destinée à mesurer l'efficacité de notre outil a été menée dans une étude ultérieure [SAL05]. Dans cette expérimentation, un taux d'erreurs élevé a été obtenu qui ne correspondait pas à un compromis temps précision qu'un géologue pourrait accepter dans le contexte réel. Le protocole a été modifié pour contraindre les sujets à réduire au maximum leurs erreurs afin d'évaluer notre technique uniquement sur les temps de mouvements.

La surface synthétique à segmenter (figure 4.18) est d'une épaisseur de 20 pixels et son équation est (6)

$$(6) f(x) = y / a * \cos(y / b) + G(z)$$

Avec les paramètres $a = 10$; $b = 30$;

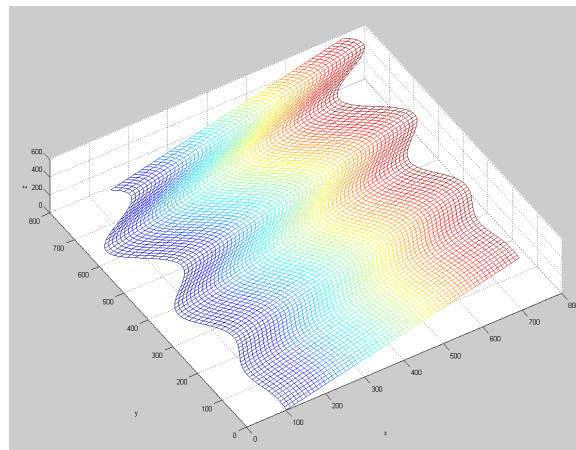


Fig. 4.34 Surface synthétique à segmenter en vue 3D.

Chaque coupe de taille 800* 800 pixels intersecte une partie de la surface que nous appellerons tunnel. Le coefficient Y évolue linéairement, la surface ne se déforme pas d'une

section à l'autre. D'un autre côté, les valeurs des Z ont été définies par une succession de nombres aléatoires convolués à une fonction gaussienne $G(Z)$. L'amplitude maximale du déplacement du tunnel est de 46.7 pixels avec une accélération maximale de 1.24 pixels.s⁻². Afin que le sujet ne mémorise pas les déplacements de ce tunnel, des valeurs de Z différentes ont été utilisées pour l'apprentissage. L'animation est effectuée à une vitesse de 12 images par seconde le long de la dimension Z . La coupe projective utilisée est composée par un contexte présent et un contexte futur avec un angle de 5 degrés situé à 10 pixels de la position courante du curseur (figure 2.10).

Les instructions données aux sujets sont de conserver leur curseur à l'intérieur du tunnel tout en le déplaçant du bas vers le haut sans jamais revenir en arrière. Pour chaque nouvel essai les sujets replacent leur curseur à l'intérieur d'un carré situé au bas du tunnel initialement affiché en rouge. L'essai débute une fois franchie une ligne horizontale localisée à cinquante pixels du carré. A partir de ce moment, le tunnel change de couleur et devient vert. Si le curseur se déplace en dehors du tunnel la bordure redevient rouge pour fournir un retour visuel sur l'erreur. L'essai se termine lorsque la ligne d'arrivée située en haut de l'écran est franchie. Afin de contraindre le compromis temps/précision, les essais d'apprentissage sont renouvelés jusqu'à ce que le sujet ne commette aucune erreur. En fin d'expérience, il est demandé aux sujets de classer par ordre de préférence les techniques de visualisation. Un nombre de points allant de 1 à 3 est affecté à chaque technique en fonction du classement. L'ensemble de l'expérience est accompli dans l'interface N'D.

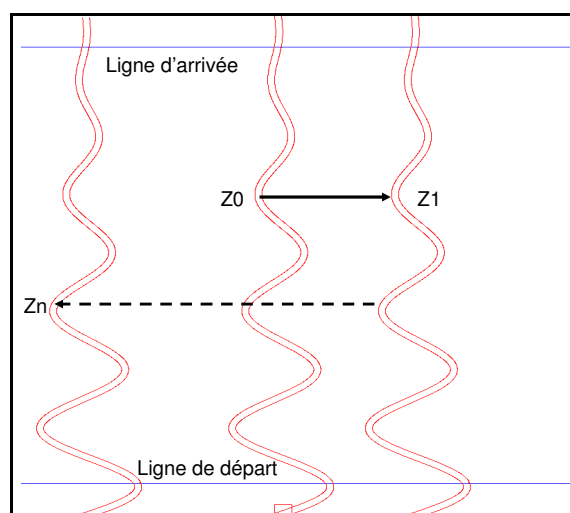


Fig. 4.35 L'intersection des coupes aux temps t_0 , t_1 et t_n avec la surface synthétique (tunnel).

Nous avons sollicité seize sujets (10 hommes et 6 femmes) de moyenne d'âge de 27,2 ans pour cette expérience, tous droitiers. Les sujets sont tous des utilisateurs quotidiens de la souris avec une moyenne de 6 heures par jour.

L'environnement expérimental est constitué par deux écrans Mitsubishi Diamond 2070 (22 pouces avec une résolution de 1280 * 1024 pixels). L'ordinateur est un pentium IV 3 Ghz avec 2 Go de Ram et une carte graphique GeForce 6800 GT avec 256 Mo de mémoire. Le système d'exploitation est un Windows XP SP2 avec une version 1.2.15 du logiciel N'D. La souris optique utilisée est une LOGITECH MX 700.

4.4.2 Variables étudiées

La variable indépendante évaluée au cours de cette expérience est la technique de visualisation composée de trois modalités : une coupe 2D standard (CS) avec un Z constant (Z0), les coupes dynamiques (CD) et les coupes projectives (CP). L'ordre de passage des modalités est déterminé par une méthode en carré latin pour neutraliser les effets d'ordre. Chaque sujet réalise cinq essais pour chaque condition expérimentale après une période d'apprentissage. L'apprentissage est réitéré jusqu'à ce que le sujet accomplisse la tâche avec un taux d'erreur inférieur à 5%. Les variables dépendantes mesurées pour cette expérience sont le pourcentage d'erreurs et les temps de mouvements. Le pourcentage d'erreurs est le nombre de points situés en dehors du tunnel par rapport au nombre total de points. Le temps de mouvement est la durée écoulée depuis le moment où le sujet franchit la ligne de départ jusqu'au franchissement de la ligne d'arrivée. Le temps de mouvement est un bon indicateur de la prise de risque conditionnée par la facilité de s'adapter aux variations de l'environnement.

4.4.3 Résultats

Pour les temps de mouvement, l'ANOVA obtenue donne un résultat significatif $F[14,2] = 11,175$ $p < 0,05$. Des t-tests pour groupes appariés ont été calculés entre chaque paire de modalités sur cette variable. Les résultats sont significatifs excepté pour la paire coupe statique et coupe projective.

Fig. 4.36 t-test Temps	Fig. 4.37 Comparaison CS - CD	Fig. 4.38 Comparaison CS-CP	Fig. 4.39 Comparaison CD-CP
Fig. 4.40	Fig. 4.41 $T(15) = -4,525$; $p < 0,001$	Fig. 4.42 $T(15) = -1,944$; $p = 0,071$	Fig. 4.43 $T(15) = 2,739$; $p < 0,05$

Les sujets ont été plus rapides avec la coupe statique avec une moyenne 7467 ms et plus lents avec la coupe dynamique avec une moyenne de 9420 ms (figure 4.20). Les changements de position de la surface entraînent des mouvements du tunnel difficiles à prévoir. Nous avons pu observer que les sujets sont contraints d'accomplir de nombreuses corrections dans la trajectoire. Afin de ne pas commettre d'erreurs le compromis temps/précision adopté par les utilisateurs tient compte des variations de position du tunnel. En revanche avec la coupe projective les sujets ont été plus rapides en 8171 ms. La prévisualisation leur a permis d'anticiper les changements de position du tunnel et d'être plus rapide. D'après la taxonomie de Accot [ACC01], présentée dans le chapitre précédent notre technique de visualisation est capable de transformer l'environnement ouvert de la tâche de pointé dynamique en un environnement fermé.

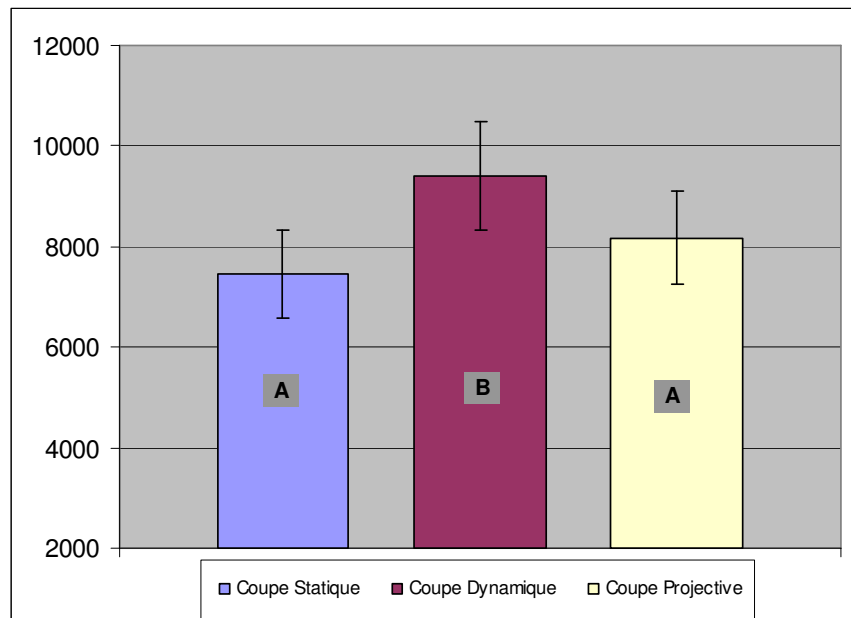


Fig. 4.44 Temps de mouvement (ms) pour les techniques de visualisation.

Pour le pourcentage d'erreurs, pour que l'analyse de variance respecte les hypothèses de normalité, nous avons appliquée une transformation arc-sinus à la racine carré. Le calcul de l'ANOVA ne donne pas un résultat significatif $F[14,2] = 0,822$; $p = 0,452$. Néanmoins nous pouvons noter que, pour l'ensemble des modalités, les sujets ont respecté le protocole avec des moyennes de taux d'erreur inférieur à 5%. La coupe dynamique avec 2%, d'erreur, présente le pourcentage le plus élevé, suivie par la coupe projective avec 1.9% et la coupe statique 1,2%.

Cette expérimentation a permis de valider l'influence positive de la technique de visualisation par coupe projective. Ces résultats corroborent ceux de l'évaluation subjective menée au terme de l'expérience pour laquelle 14 sujets sur 16 estiment être plus performants avec cet outil. La coupe projective fournit des informations sur l'évolution de l'environnement qui aide à l'anticipation. Nous avons donc la confirmation que la technique de pointé dynamique se trouve optimisée et offre aux utilisateurs la possibilité d'adopter un compromis temps/précision véritablement plus acceptable.

4.5 Comparaison de la souris et de la tablette graphique

Cette dernière expérimentation est une extension de l'étude précédente qui reprend le même protocole (procédure, sujets, faille synthétique et environnement expérimental). Son objectif est de comparer deux périphériques d'entrée (souris et tablette) pour un pointé dynamique d'une faille synthétique avec des coupes animée classique. Le choix de ces périphériques est lié aux résultats obtenus par Accot et Al dans [ACC99] et par nos études précédentes [SAL03]. On peut conclure dans ces études que ces deux dispositifs s'avèrent être plus performants pour la réalisation d'une tâche trajectorielle statique avec un léger avantage pour la tablette. La tablette graphique, utilisée en mode absolu, est une WACOM INSTUOS 2 A4. La souris optique est une LOGITECH MX 700 avec une fonction de transfert d'ordre 1 (sans accélération) avec une valeur de gain intermédiaire. Les sujets testés sont expérimentés dans l'utilisation de la souris avec une moyenne de six heures par jour. En revanche, uniquement trois d'entre eux avaient déjà utilisé une tablette graphique.

Les deux périphériques sont comparés au moyen de trois mesures. La première correspond à la moyenne des distances des points situés en dehors du tunnel par rapport à ses parois. Cette distance est évaluée entre chaque point acquis et son référent le plus proche situé sur la paroi adjacente (gauche ou droite). La deuxième métrique est le pourcentage des erreurs qui sont commises par les utilisateurs, ce taux nous renseigne sur leur respect du protocole expérimental. La troisième mesure est la moyenne des temps de parcours effectués par l'ensemble des sujets. Elle est utilisée pour estimer le compromis temps/précision adopté par les utilisateurs.

Des t-tests pour groupes appariés ont été appliqués pour chacune des variables dépendantes mesurées. Pour chacun des tests les résultats sont significatifs.

Fig. 4.45 Variables dépendantes	Fig. 4.46 Distance	Fig. 4.47 Pourcentage d'erreur	Fig. 4.48 Temps de mouvement
Fig. 4.49 t-test	Fig. 4.50 $T(15) = -3,777$; $p < 0,05$	Fig. 4.51 $T(15) = 2,730$; $p < 0,05$	Fig. 4.52 $T(15) = -2,312$; $p < 0,05$

La souris permet de réaliser une trajectoire plus proche du tunnel avec une moyenne de 12,24 pixels contre 13,19 avec la tablette graphique. Même si cette différence de moins de 1 pixel semble faible, il est nécessaire de rappeler qu’avec la résolution classique des données sismiques, cette erreur correspond à une dizaine de mètres sur le terrain. Pour le pourcentage d’erreurs, les résultats sont également relativement proches avec 1,9% pour la souris et 0,3% pour la tablette. On peut donc admettre que les sujets ont respecté un compromis temps/précision destiné à commettre le moins d’erreurs possibles. En ce qui concerne les temps de mouvement, les sujets sont relativement plus rapides avec la souris (une moyenne de 8171 ms contre 9274 ms avec la tablette). On peut traduire ce résultat par le fait que la tablette est utilisée en mode absolu et nécessite ainsi des mouvements d’amplitude plus importante que la souris.

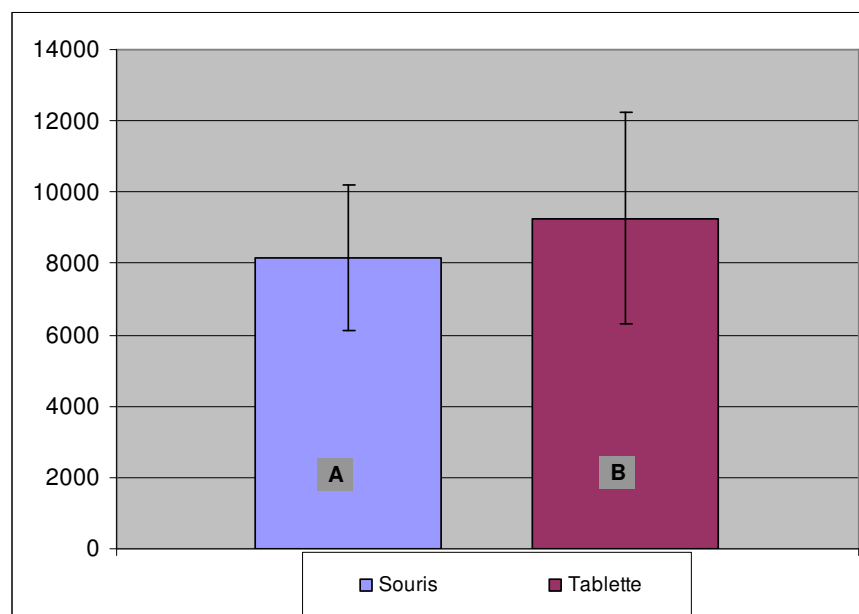


Fig. 4.53 Temps de mouvement pour la souris et la tablette graphique.

Dans le cadre de l’évaluation subjective, 10 sujets sur 16 ont préféré utiliser la tablette graphique. Les résultats obtenus sont cohérents par rapport aux observations de Baber [BAB97] sur la supériorité de la souris au niveau de la précision et des temps de mouvements et son infériorité au niveau de la préférence des utilisateurs (figure 3.12). On peut émettre une remarque sur le fait que ces résultats peuvent s’expliquer par un effet de nouveauté positif.

Néanmoins Accot [ACC99], obtient des temps de mouvement légèrement plus faibles avec la tablette. Cette inversion de tendance est probablement liée au fait qu'Accot utilise une fonction de transfert d'ordre 2 qui facilite les mouvements de grande amplitude. Cette accélération du curseur ne permet pas en revanche la réalisation de mouvements fins et de micro-corrrections imposées par notre environnement dynamique. Néanmoins, il faut noter que nous n'avons pas eu la chance de tester des sujets experts dans l'utilisation de la tablette. Nous pouvons donc admettre en conclusion que ces deux dispositifs de pointé sont relativement adaptés à l'accomplissement du pointé dynamique par rapport à d'autres dispositifs (oculomètre, pointeur 3D) testés dans nos travaux précédents [SAL05].

4.6 Synthèse

Dans ce dernier chapitre, nous avons pu valider empiriquement les principales hypothèses formulées dans notre étude. Premièrement, l'animation des sections sismiques semble être un bon procédé pour améliorer la localisation des failles, en particulier dans le cas de données fortement bruitées. Au travers d'une expérience de psychophysique, nous avons pu démontrer un lien significatif entre l'accroissement de la sensibilité du système visuel pour la détection d'un signal particulier et l'augmentation de la vitesse d'animation du fond dans lequel se trouve ce signal. Deuxièmement, les techniques d'interactions proposées ont pu être testées dans un contexte opérationnel. Elles ont particulièrement séduit les experts par leur facilité d'utilisation et leur capacité à réduire la durée de la tâche de segmentation. Le PDA permet de diviser par un facteur cinq le temps de pointé par rapport à la technique traditionnelle tout en préservant une charge de travail relativement satisfaisante. Troisièmement, une évaluation quantitative a permis de classer le PDM comme le meilleur compromis entre le PDA et le PS en termes de précision du pointé et de l'homogénéité de la répartition des points. Ensuite, nous avons pu montrer que la coupe projective est un outil de visualisation qui, en facilitant l'anticipation, va abaisser le nombre d'erreurs engendrées par le PDA. Enfin, une comparaison de périphériques d'entrées pour le contrôle du pointé dynamique a démontré que pour des utilisateurs expérimentés, la souris reste un dispositif de pointé relativement efficace tout comme la tablette graphique.

Conclusions et perspectives

La détection supervisée est le processus destiné à isoler les informations décrivant certaines structures géologiques clés afin de réduire la subjectivité de l'interprétation structurale et pérenniser l'expertise mise en oeuvre. A l'opposé des approches automatiques de segmentation des failles, rapides mais peu robustes, les approches supervisées sont pour l'heure en géoscience la seule alternative opérationnelle vis-à-vis des nombreuses distorsions présentes dans la donnée. Notre travail a donc consisté à proposer et valider de nouvelles techniques de visualisation interactive pour la détection supervisée afin de générer de manière efficiente dans une vue 3D un modèle de réseaux de failles. Ce travail a contribué aux dépôts de deux brevets en protection industriels [BER04][BER05] dans le cadre de l'interaction 3D et de trois articles [SAL05][SAL05][SAL06].

Dans le premier chapitre, un certain nombre de définitions et de modèles théoriques ont pu être exposés. Nous avons ensuite présenté une méthodologie de l'analyse de la tâche détection supervisée dans le cadre de l'interprétation structurale. Cette modélisation nous a servi à établir une hiérarchisation de la tâche étudiée en sous tâches. A partir d'une analyse basée sur ce modèle, nous avons émis un certain nombre de recommandations concernant la migration de la détection supervisée vers un environnement 3D.

Le deuxième chapitre a donné lieu à une réflexion centrée sur les mécanismes de traitement de l'information visuelle et cognitif pour l'analyse de données sismiques. Plus particulièrement, nous nous sommes attachés à décrire les traitements liés à la perception du mouvement, aux contours virtuels et à l'imagerie mentale. Un certain nombre d'hypothèses ont été formulées sur le déroulement de ces mécanismes dans le contexte spécifique de la localisation et de la construction mentale des failles. Nous avons ensuite décrit de nouvelles techniques de visualisation adaptées à notre problématique. La première de ces méthodes, la coupe adaptative est un outil de visualisation fondé sur un rendu par texture volumique capable d'afficher en temps réel n'importe quelle section oblique de la donnée sismique. La deuxième, la coupe projective est une solution qui, au travers d'une information multicontextuelle, aide l'utilisateur à anticiper les variations géométriques des structures géologiques présents dans la donnée. La troisième, consiste en trois cartes d'orientation

représentées sous la forme de vignettes. Ces cartes sont destinées à guider l'interpréteur dans sa construction du réseau de failles.

Le chapitre trois a eu pour objet la proposition d'un ensemble de techniques d'interactions dédiées au contrôle des outils de visualisation. Les deux techniques de pointé dynamique (PDA et PDM) dédiées à la segmentation manuelle ont été définies par rapport aux solutions rencontrées dans la littérature. Afin de mettre en relief les différences qui existent entre ces deux techniques dynamiques, nous sommes appuyés sur une taxonomie décrivant les caractéristiques de leur tâche de sélection. Enfin une étude sur les périphériques d'entrée les mieux adaptés au contrôle de ces techniques a été menée pour nous servir de guide de référence.

Le chapitre quatre a consisté à présenter une série d'expériences destinées à statuer sur la validité de nos propositions. Nous avons pu démontrer au moyen d'une expérience psychophysique que l'animation des sections sismiques améliore la détection d'un signal inclus dans un environnement bruité dynamique. Les techniques d'interaction dynamique ont été testées dans un contexte opérationnel par des spécialistes de l'interprétation structurale. Ces techniques ont montré leur faculté à réduire notablement la durée de la tâche de segmentation. Une expérience effectuée sur un nombre plus conséquent d'utilisateurs novices a permis de classer le PDM comme le meilleur compromis entre le PDA et le PS en termes de précision et de complétude du nuage de points obtenu. Une autre expérience a mis en avant l'intérêt d'utiliser la coupe projective lors d'un PDA afin de diminuer le nombre d'erreurs engendrées par les utilisateurs. Enfin, une comparaison de périphériques d'entrées pour le contrôle des pointés dynamiques a prouvé que pour des utilisateurs entraînés, la souris reste un dispositif relativement efficace par rapport à une tablette graphique.

Un certain nombre de pistes ont émergé au cours de nos recherches dont certaines offrent des perspectives qu'il nous paraîtrait judicieux d'explorer. Nous avons par exemple développé un outil de prédiction fondé sur une estimation de la trajectoire future du curseur en fonction de sa trajectoire antérieure au moyen d'un filtre de Kalman. Comme la coupe projective facilite la prévisualisation, nous pensons que cet outil devrait permettre aux utilisateurs d'améliorer la prédiction de la position du curseur et d'anticiper plus facilement les erreurs. A l'heure où nous finalisons ce manuscrit, nous étudions l'intérêt d'employer un périphérique à retour haptique pour la segmentation manuelle. En couplant le retour de force aux attributs

sismiques (cohérence, amplitude), la segmentation devrait être améliorée au travers de cette nouvelle modalité sensorielle.

L'intégration des techniques de visualisation et d'interaction dans le logiciel SISIMAGE devrait être soumise à l'approbation d'un nombre plus important d'interpréteurs. A l'heure actuelle, la majorité des interpréteurs utilisent encore la technique de pointé statique en 2D. On peut donner différentes explications à cette remarque. Premièrement il est évident qu'un laps de temps est toujours indispensable pour que des utilisateurs changent leurs habitudes de travail. Deuxièmement, nous pensons qu'une évaluation ergonomique de la plateforme d'interprétation devrait mettre en lumière des problèmes d'utilisabilité qui pourraient expliquer pourquoi les utilisateurs paraissent encore frileux dans l'utilisation de ces méthodes. Enfin, il serait intéressant de tester nos outils dans un autre cadre opérationnel. L'exploration et la segmentation sont en effet des tâches que rencontrent les interpréteurs d'images biomédicales.

Bibliographie

- [ACC01] Accot J. (2001). Les tâches trajectorielles en Interaction Homme-Machine. Cas des tâches de navigation. Thèse de l'Université de Toulouse 1.
- [ACC99] Accot J., Zhai S. (1999). Performance evaluation of input devices in trajectory-based tasks: an application of the steering law. Proceedings of Conference on Human factors in Computing Systems. 466-472.
- [BAB97] Baber C. (1997). Beyond the desktop. Academic Press.
- [BAD86] Baddeley A. D. (1986). Working memory, Oxford, Clarendon Press.
- [BAH95] Bahorich M. S., Farmer S.L. (1995). 3-D seismic discontinuity for faults and stratigraphic features: The coherence cube. The Leading Edge. 14 : 1053-1058.
- [BEA04] Beaudouin-Lafon M. (2004.) Designing interaction, not interfaces. Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual interfaces. 15-22.
- [BEC06] Becerra J. (2006). Contribution à la segmentation supervisée de données volumiques : modèle perceptuel et développement d'outils interactifs d'aide à l'interprétation d'images sismiques. Thèse de l'Université Bordeaux 1.
- [BER97] Berthoz A. (1997). Le sens du mouvement. Odile Jacob.
- [BER06] Berthoumieu Y. (2006). Apports des modèles paramétriques associés aux modèles perceptuels et cognitifs pour l'aide à l'interprétation de données 3D. HDR de l'Université Bordeaux 1.
- [BER04] Berthoumieu Y., Donias M., Guillon S., Keskes N.. (2004). Procédé et programme de reconstruction de plans de fracture. Brevet Européen, avec cession de licence, N°EP04292530.5 DPI.
- [BER05] Berthoumieu Y., Donias M., Guillon S., Keskes N.. (2005). Extraction de plans de fracture dans un bloc sismique. Brevet Européen, avec cession de licence, N°EP05290689.8 DPI
- [BOW05] Bowman D. A., Kruift E., Laviola J. J., Poupyrev I. (2005). 3D User Interfaces: Theory and Practice. Addison Wesley.
- [BOY03] Boy G. (2003). Ingénierie Cognitive: Interaction Homme-Machine et Cognition. Hermes - Lavoisier.
- [BUX05] Buxton W., Billinghamurst M., Guiard Y, Sellen A, Zhai S. (2005). Human input to computer systems: Theories, Techniques and Technology", chapitre Two-Handed Input in Human-Computer Interaction. A paraître.

- [CAR03] Carroll J. M. (2003). HCI Models, Theories, and Frameworks: Toward a Multidisciplinary Science. Morgan Kaufmann.
- [CAR83] Card S. K., Moran T. P., Newell A. (1983). The psychology of human - computer interaction. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- [CAS05] Castanie L., Levy B., Bosquet F. (2005). Advances in seismic interpretation using new volume visualization techniques. *First Break*. 23 : 69-72.
- [COL04] Collomb M., Hascoët M. (2004). Speed and accuracy in throwing models. *HCI'04*. 2 : 21-24.
- [DAR05] Darken R. P., Durost R. (2005). Mixed-dimension interaction in virtual environments. *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*. 38-45.
- [DAR99] Darken R. P., Cevik H. (1999). Map usage in virtual environments: orientation issues. *Proceedings of IEEE Virtual Reality*. 133-140.
- [DOR98] Dorn G. A. (1998). Modern 3-D seismic interpretation. *The Leading Edge*. 17 : 1262-1273.
- [FIT54] Fitts P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*. 4 : 381-391.
- [FOL84] Foley J., Wallace V., Chan P. (1984). The human factors of computer graphics interaction techniques. *IEEE Computer Graphic Applications*. 4 : 13-48.
- [FOL94] Foley J.D., Van Dam A., Feiner S.K., Hughes J.F. (1997) *Computer Graphics: Principles and Practice*. Second Edition in C. Addison Wesley.
- [FRO00] Fröhlich B., Plate J., Wind J., Wesche G., Göbel M. (2000). Cubic-mouse-based interaction in virtual environments. *IEEE Computer Graphics and Applications*. 20: 12-15.
- [FUR86] Furnas G. W. (1986). Generalized fisheye views. *Proceedings of the Conference on Human Factors in Computing Systems*. 16-23.
- [GAL02] Calvary G. (2002). Ingénierie de l'interaction homme-machine : rétrospective et perspectives, *Interaction homme-machine et recherche d'information*. *Traité des Sciences et Techniques de l'Information*, Lavoisier, Hermès. 19-63.
- [GIB79] Gibson J. (1979). The ecological approach to visual perception. Lawrence Erlbaum Associates.
- [GUI87] Guiard Y. (1987). Asymmetric division of labor in human skilled bimanual action: the kinematic chain as a model. *Journal of Motor Behavior*. 19 : 486-517.

- [GUT03] Gutwin C., Skopik A. (2003). Fisheyes are good for large steering tasks. Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 201-208.
- [HAC04] Hachet M., Guitton P., Reuter P., Tyndiuk F. (2003). The CAT for efficient 2D and 3D interaction as an alternative to mouse adaptations. Proceeding of ACM SIGGRAPH. 23 : 728-731.
- [HAR88] Hart S.G., Staveland L.E., (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): results of empirical and theoretical research. Human Mental Workload. 139-183.
- [HAR02] Harders M., Wildermuth S., Szekely G. (2002). New paradigms for interactive 3D volume segmentation. Visualization and Computer Animation. 13 : 85-95.
- [HER01] Herault J. (2001). De la rétine biologique aux circuits neuromorphiques. Traité IC2, Les Systemes de Vision, Hermès.
- [HIN98] Hinckley K., Pausch R., Proffitt D., Kassell N. F. (1998). Two-handed virtual manipulation. ACM Transaction in Human-computer Interaction. 5: 260-302.
- [IGA98] Igarashi T., Kadobayashi R., Mase K., Tanaka, H. (1998). Path drawing for 3D walkthrough. Proceedings of ACM Symposium on User interface Software and Technology. 173-174.
- [JAC94] Jacob R.J.K., Sibert L.E., McFarlane D.C., Mullen M.P. (1994). Integrality and Separability of Input Devices. ACM Transactions on Computer-Human Interaction. 1 : 3-26.
- [KAB94] Kabbash P., Buxton W., Sellen A. (1994). Two-Handed Input in a Compound Task. Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 417-423
- [KAH73] Kahneman D., Ben-Ishai R., Lotan M. (1973). Relation of a test attention to road accidents. Journal of applied psychology. 58 : 113-155
- [KAJ89] Kajiya J., Kay T. (1989). Rendering fur with three dimensional textures. Proceeding of SIGGRAPH, 271-280.
- [KAN97] Kanizsa G. (1997). La grammaire du voir, Diderot, Pratique des sciences.
- [KOS78] Kosslyn S. M., Ball T. M., Reiser, B. J. (1978). Visual images preserve metric spatial information: evidence from studies of image scanning. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance. 4 : 47-60.
- [MAC91] Mackinlay J., Robertson, G., Card S. (1991). The perspective wall: Detail and context smoothly integrated. Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 56-63.

- [MAC05] Macmillan N. A., Creelman C. D. (2005) Detection theory: a user's guide. LEA, 2nd edition.
- [MAR82] Marr D. (1982). Vision. Freeman Publishers
- [MAT98] Matlin M. W. (1998). La cognition. Une introduction à la psychologie cognitive. De Boeck Université.
- [NOR90] D. A. Norman. (1990). The Design of Everyday Things. Doubleday.
- [NOR86] Norman D.A., Draper, S.W. (1986). User-Centered System Design. Hillsdale, New Jersey: Ehrlbaum Associates.
- [PIA66] Piaget J., Inhelder B. (1966). L'image mentale chez l'enfant, Paris, PUF.
- [RAM86] Ramachandran V. S., Anstis S. M. (1986). The perception of apparent motion. Scientific American. 254 : 102-109.
- [ROU98] Roulin J. L. (1998). Psychologie Cognitive. Bréal.
- [RUB04] Rubio S., Diaz E., Martin J., Puente, J.M., (2004). Evaluation of subjective mental workload: a comparison of SWAT, NASA-TLX, and Workload Profile Methods. Applied psychology: an international review. 53 : 61-86.
- [SAL05] Salom P., Megret R. Berthoumieu Y. (2005). Coupe projective pour une tâche trajectorielle dynamique. Proceedings de la Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine. 251-254.
- [SAL05] Salom P., Becerra J., Donias M., Megret R. (2005). Projective slice for a dynamic steering task. Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. 138-141.
- [SAL03] Salom P. (2003) Evaluation de périphériques pour le pointé dynamique de failles sismiques. Rapport du stage de fin d'études DESS Sciences Cognitives Appliquées. Université Victor Segalen – ENSEIRB.
- [SAL06] Salom P., Berthoumieu Y., Donias M., Megret R. (2006). Manual segmentation of surface by dynamic pointing: a new way for fault pointing in seismic interpretation. The Journal of Visualization and Computer Animation. (A paraître).
- [SCA90] Scapin D. L., Pollier A. (1990). Towards a method for task description : MAD. Elsevier.
- [SEB91] Sebillotte S. (1991). Décrire des tâches selon les objectifs des opérateurs. De l'interview à la formalisation. Le Travail Humain. 54 : 193-223.
- [SEB94] Sebillotte S. (1994). Méthodologie pratique d'analyse de la tâche en vue de l'extraction de caractéristiques pertinentes pour la conception d'interfaces. Rapport technique de l'INRIA – Rocquencourt.

- [SER97] Serra L., Hern N., Choon C. B., Poston T. Interactive Vessel Tracing in Volume Data. Proceedings of ACM Symposium on Interactive 3D Graphics. 131-137.
- [SET96] Sethian J.A. (1996). Level-set methods. Evolving interfaces in geometry, fluid mechanics, computer vision and material science. Cambridge University Press.
- [SHA48] Shannon C. R. (1948). A mathematical theory of communication. The Bell System Technical Journal, 27:379-423, 623-656.
- [SHE71] Shepard R. N., Metzler J. (1971). Mental rotation of three dimensional objects. Science.171 : 701-703
- [SHN98] Shneiderman B. (1998). Designing the user interface (third edition). Addison Wesley.
- [SHN97] Shneiderman B., Maes P. (1997). Direct manipulation vs. interface agents. *interactions* 4 : 42-61.
- [STJ01] St. John M., Cowen M. B., Smallman H. S. Oonk H. M. (2001). The Use of 2D and 3D Displays for Shape Understanding vs. Relative Position Tasks. Human Factors. 43 : 79-98.
- [TOR06] Tory M, Kirkpatrick A. E., Atkins M. S., Möller T. (2006). Visualization Task Performance with 2D, 3D, and Combination Displays. IEEE Transaction on Visualisation.and Computer Graphics. 12 : 2-13.
- [TOR03] Tory M. Mental Registration of 2D and 3D Visualizations (An Empirical Study). (2003), IEEE Visualization. 371-378.
- [TRE80] Treisman A. M., Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. Cognitive Psychology. 12 : 97-136.
- [TRI98] Tricot A., Nanard J. (1998).Un point sur la modélisation des tâches de recherche d'informations dans le domaine des hypermédias. Les hypermédias, approches cognitives et ergonomiques, Hermès.
- [TYN05] Tyndiuk F. (2005). Référentiels Spatiaux des Tâches d'Interaction et Caractéristiques de l'Utilisateur influençant la Performance en Réalité Virtuelle. Mémoire de doctorat réalisé à l'Université Bordeaux 2.
- [VAN97] Van Dam A. Post-WIMP User Interfaces. Communications of the ACM 1997. 40 : 63-67.
- [WAR04] Ware C. (2004). Information Visualization, Second Edition: Perception for Design The Morgan Kaufmann Series.
- [WIC99] Wickens C. D., Hollands J. G. (1999). Engineering psychology and human performance (Third edition). Prentice Hall.

- [WIC04] Wickens C. D, Lee J, Liu Y., Becker S. G. (2004). An Introduction to Human Factor Engineering (Second Edition). Prentice Hall.
- [ZHA98] Zhai S., Milgram P. (1998). Quantifying coordination in multiple DOF movement and its application to evaluating 6 DOF input devices. Proceedings of the conference on Human factors in computing systems. 320-327.
- [ZHA96] Zhai S., Milgram P., Buxton W. (1996). The influence of muscle groups on performance of multiple degree-of-freedom input. Proceedings of the conference on Human factors in computing systems. 308-315.
- [ZHA95] Zhai S. (1995). Human performance in six degree of freedom input control. Thèse de l'Université de Toronto.