



Quatrième École Thématique du CNRS sur les EIAH

Simulation, réalités virtuelles et augmentées pour les apprentissages professionnels

Du dimanche 2 au vendredi 7 juillet 2006 à La Grande Motte

Cours 1.2

*Ergonomie de l'interaction dans les environnements virtuels
d'apprentissage*

Jean-Marie Burkhardt

Ergonomie de l'interaction dans les environnements virtuels d'apprentissage

J-M. BURKHARDT^{1,2}

¹Unité d'Ergonomie, Université Paris 5, 45 rue des Saints-Pères, 75006 Paris

²Projet EIFFEL, INRIA, Rocquencourt, BP 105, 78153, Le Chesnay, cedex, France

jean-marie.burkhardt@univ-paris5.fr

La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

objectifs

- pointer les défauts et les questions actuels liés à l'interaction utilisateur/apprenant – environnement virtuel
- donner un pointeur sur les méthodes, les techniques et les outils actuels pour y apporter des réponses ;
- présenter l'intégration de cet aspect dans l'ingénierie globale des environnements virtuels pour l'apprentissage

La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

Plan

- Introduction
- Ergonomie des environnements virtuels d'apprentissage (EVA)
- Méthodes, techniques et outils actuels de l'ergonomie pour la conception et l'évaluation des EVA
- Conclusion, perspectives

La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

Plan

- Introduction
- Ergonomie des environnements virtuels d'apprentissage
- Méthodes, techniques et outils actuels de l'ergonomie pour la conception et l'évaluation
- Conclusion, perspectives

La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

L'ergonomie, c'est quoi?

- Ergonomie :
 - Une discipline finalisée : améliorer la conception et l'évaluation des situations et outils de travail (et non des seules interfaces) ; par extension , également des situations d'apprentissage, EIAH
 - Qui interagit de façon privilégiée avec la psychologie, la physiologie, la sociologie, etc.
 - Une discipline qui importe autant qu'elle génère des connaissances
- Ergonomie : mais aussi *human factors*, *HCI*, *usability engineering*, etc.

La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

Sous-disciplines /spécialisation

Ergonomie physique

caractéristiques anatomiques, anthropométriques, physiologiques et biomécaniques de l'Homme dans leurs relations avec l'activité physique

Ergonomie cognitive

processus mentaux, tels la perception, la mémoire, le raisonnement et les réponses motrices, dans leurs effets sur les interactions entre les personnes et d'autres composantes d'un système

Ergonomie organisationnelle

La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

Apports au processus de conception

- Caractéristiques génériques du fonctionnement de l'Homme (individuel et dans un collectif)
 - Physiologie, Psychologie, etc.
- Méthodes d'analyse ergonomique de l'activité / des situations
 - Observations ethnographiques, participation
 - Expérimentation ou quasi-expérimentation, simulation
 - Entretiens, questionnaires, verbalisations provoquées, etc
- Procédures d'évaluation des systèmes / des situations
 - Critères/ dimensions (e.g. Nielsen, 1993 ; Tricot, Plébat-Soutjis, Camps, Amiel, Lutz & Morcillo, 2003 ; Hornbaek, 2005) :
 - Techniques, e.g. Cognitive Walkthrough (Carroll, 1990), Guidelines reviews, Standards inspection, Normes ISO 9241, etc.
 - Tests et autres procédures fondées sur les utilisateurs

La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

Familles de Critères

UTILITE (angl. Usefulness)

Avantage et ou agrément significatif pour une activité (efficacité, coût, rapidité, précision...) et un utilisateur spécifié, par rapport aux :

- outils existants, utilisés
- caractéristiques des situations d'utilisation
- activités périphériques et interdépendantes

⇒ Apprenant : activités d'apprentissage, transfert

⇒ Formateur : activités liées à la situation d'apprentissage

La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

Familles de Critères (2)

UTILISABILITE (angl. Usability)

Niveau de *performance* dans l'utilisation prévue, affecté par :

- Facilité d'apprentissage
- Facilité de mémorisation
- Efficacité d'utilisation
- Utilisation sans erreurs
- Etc.

Degré selon lequel un produit peut être utilisé par des utilisateurs identifiés, pour atteindre des buts définis avec efficacité, efficience et satisfaction, dans un contexte spécifié (ISO 9241-11)

La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

Familles de Critères (3)

ACCESSIBILITE (angl. Acessibility)

Aménagement de l'accès aux systèmes d'information pour les personnes atteintes de handicaps plus ou moins importants (cognitif, visuel, auditif, moteur,...)

DANGEROUSITE (Health & Safety)

Ensemble des conséquences négatives possibles associées à l'utilisation du système

- individuel, collectif, environnement proche ou extérieur, matériel, santé, social, développement ...
- erreurs (suppression, anticipation, évitement ...)
- ≠ utilisabilité

La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

Familles de Critères (4)

SATISFACTION (angl. Satisfaction, Enjoyment)

Expérience globalement positive qui marque de façon durable les utilisateurs du produit ou de l'outil conçu.

- sur le plan de la pensée,
- des sensations
- des émotions,
- etc.

ACCEPTABILITE (angl. Acceptability)

Valeur positive ou négative de l'image que se fait un individu (ou un groupe) à propos de l'outil ou du système

La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

Plan

- Introduction
- Ergonomie des environnements virtuels d'apprentissage (EVA)
- Méthodes, techniques et outils actuels de l'ergonomie pour la conception et l'évaluation d'EVA
- Conclusion, perspectives

La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

Ergonomie des EV et des situations d'apprentissage

- 1) Analyser le travail/ l'activité pour concevoir ou aménager la formation
- 2) Concevoir et évaluer l'ergonomie des outils et supports pour l'apprentissage et la formation
- 3) *L'analyse du travail en tant qu'outil de l'apprenant et du formateur*

La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

Les EVA aujourd'hui

- Défauts d'utilité
 - conception souvent non centrée sur les utilisateurs
 - quelles tâches pour quelle activité?
 - apprenant" plus considéré que "le formateur"
 - Implications socio-techniques et contraintes de situations remises à + tard!
- Défauts d'utilisabilité
 - Manipulation 3D, dialogue et interactions
 - Représentation des utilisateurs, points de vue
 - Désorientation
 - Latences

La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

Les EVA aujourd'hui (2)

Points encore peu abordés aujourd'hui

- interprétation des actions de l'apprenant
- rétroactions, feedbacks
 - événement subséquent à une ou plusieurs actions de l'apprenant
 - visible & intelligible depuis la position de l'apprenant
 - apprentissage vs interaction
 - Immédiat vs différé
 - Continu vs discret
- Guidage
- Exploitation des traces par le formateur

La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

Dimensions spécifiques

- Immersion
Description objective et quantifiable du degré avec lequel l'interface du système contrôle les entrées sensorielles pour chaque modalité ; elle peut se décrire dans les termes des dispositifs logiciels et matériels particuliers utilisés (Draper, 1998)

En pratique

- Sous-ensemble des modalités impliquées dans l'interaction
- pour chaque modalité, degré de complétude, qualité, paramètres, etc. des dispositifs d'interaction utilisés
- Cohérence interne et latence globale de l'information et des réactions du système

La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

Dimensions spécifiques (2)

Realisme - “Fidélité de l’expérience perceptive”

Tâche de discrimination perceptive

Realisme - “Fidélité Psychologique”

« la mesure selon laquelle l’EV produit un comportement semblable à celui exigé dans la situation réelle » (Leplat, 1997 ; Patrick, 1992)

- Dépend du triplet (Sujet/tâche/situation)
- Evaluation sur la base de la performance

La Grande Motte - Ecole d’été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

Dimensions spécifiques (3)

Realisme - “Presence”

Projection des capacités perceptives cognitives et psychomotrices de l’utilisateur dans l’environnement simulé, de telle sorte que l’utilisateur ait l’illusion d’être et d’agir comme s’il était présent dans le monde virtuel

La Grande Motte - Ecole d’été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

Dimensions spécifiques (4)

Anthropomorphisme

Personnages humanoïdes pour représenter visuellement des agents artificiels ou des utilisateurs distants

Modes de commande/contrôle (Le Mer, 2001)

- **Mimétique** : reproduction isomorphe du comportement de l'utilisateur de façon volontaire et consciente (e.g. expressions faciales, gestes, etc.) par des moyens vidéo et/ou magnétiques;
- **Symbolique** : l'utilisateur anime (via des boutons illustrés et organisés vs analyse automatique du comportement) le clone ;
- **Marionnette** : l'utilisateur anime son clone au moyen de périphériques spécialisés, e.g. gant numérique;
- **Autonome** ; comportement lié à ce qui se passe dans l'EV, via une bibliothèque de comportements;

La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

Méthodes et techniques de l'ergonomie pour les EVA

- Les premières études
 - Aménagement physique des matériels et des dispositifs manuels d'interaction
 - Poids, encombrement, zone de contact
 - Effets consécutifs à l'exposition
 - Mal du simulateur
 - Troubles de l'orientation (vertiges, instabilité posturale e.g. [Cobb, 1999])
 - Troubles oculomoteurs (fatigue visuelle, diplopie, céphalée, etc)
 - Présence / immersion
- Approche actuelle intégrée pour la conception et l'évaluation

La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

Conception (1)

- Analyse de la situation actuelle d'apprentissage
 - Evaluer les activités et les difficultés d'apprentissage
 - Proposition d'intégration d'un outil RV à la formation
 - Point de vue des stagiaires
 - Point de vue des formateurs

- Analyse de l'activité actuelle /des tâches de la population concernée
 - Evaluer les difficultés du métier et les besoins de formation (e.g. Anastassova, Burkhardt, Mégard & Ehanno, 2005)
 - Formaliser les représentations fonctionnelles de l'expert (e.g. Boucheix, 2003)
 - Formaliser la tâche cible de l'apprentissage et l'expertise associée

La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

Ex. de représentation hiérarchique des tâches selon HTA (Patrick, 1992)

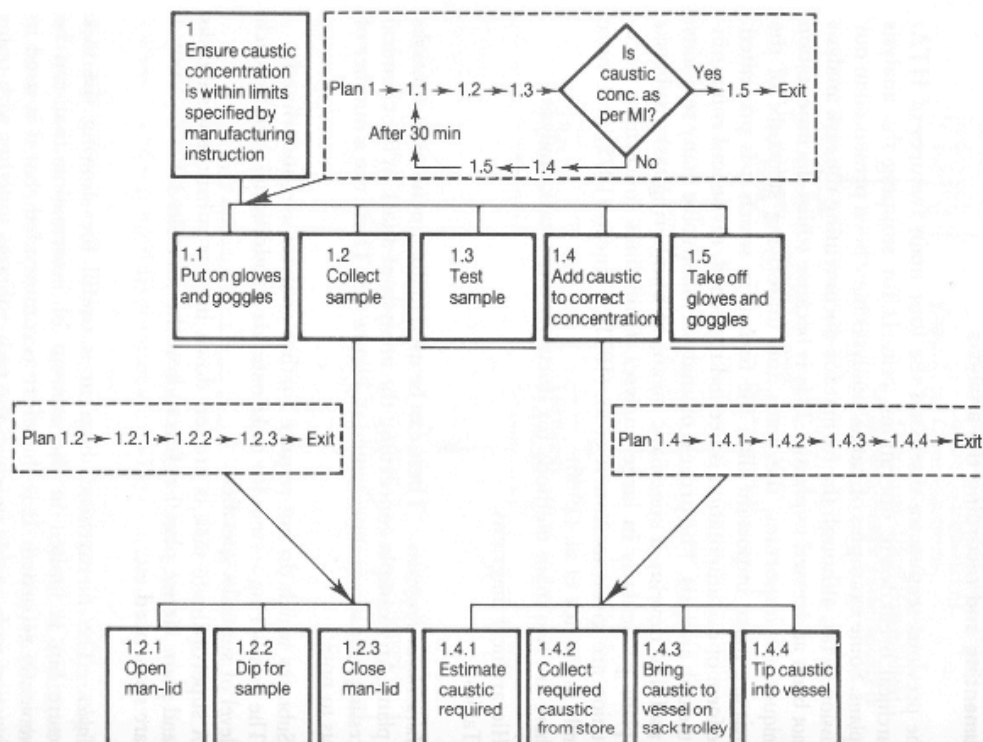


Figure 6.3 Hierarchical diagram representing analysis of a task in the chemical processing industry (Patrick et al., 1986).

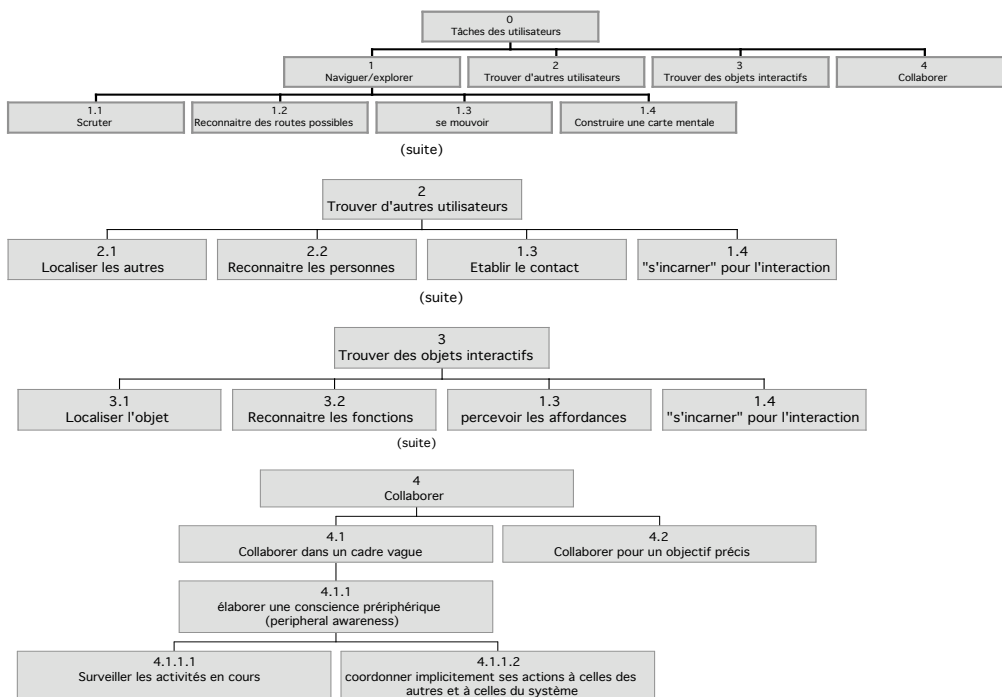
La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

Conception (2)

- Spécification ergonomique du dialogue, basée sur
 - Modèle de la tâche (d'apprentissage/ d'interaction) à soutenir
 - Solutions potentielles
 - Principes, recommandations et autres règles ergonomiques
 - Critères technique, financier, compatibilité avec les besoins
 - Évaluation/tests
- Porte notamment sur :
 - Spécification des représentations de l'utilisateur, scènes, objets et personnages
 - Choix des dispositifs d'interaction / techniques d'interaction
 - Exploitation de la multi-modalité

La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

Tâche de collaboration (e.g. Tromp, Steed & Wilson, 2003)



La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

Extrait des critères ergonomiques réorganisés et adaptés
 Pour la conception et l'évaluation d' EV (Bach, 2004)

Dimensions	Description rapide de la dimension et/ou des sous-dimensions distinguées
1. Compatibilité	<ul style="list-style-type: none"> - Degré d'accord entre les caractéristiques des tâches et des utilisateurs (mémoire, perception, habitude, compétence, âge, attente..) et l'organisation des sorties, des entrées et du dialogue. - Degré de similitude entre divers environnements ou applications.
2. Guidage	<ul style="list-style-type: none"> - Luminance, contraste, dimension des objets, fréquence sonore, intensité, timbre etc.. - Ensemble des moyens pour orienter, informer sur les actions alternatives et conduire l'utilisateur à effectuer une action spécifique - Mode d'organisation visuelle, auditive, proprioceptive etc. des items d'information, ainsi que les relations exploitées pour préciser l'appartenance ou non à l'une ou l'autre des classes et sous-classes d'items. - Réponses consécutives aux actions de l'utilisateur, avec un délai de réponse approprié et homogène, pour le renseigner sur l'action accomplie et son résultat
2.1 Lisibilité	
2.2 Incitation	
2.3 Groupement/distinction entre items	
<ul style="list-style-type: none"> - par la localisation - par le format - par le comportement 	
2.4 Feedback immédiat	

La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

Un début de recensement et de validation de principes ergonomiques pour la conception des représentations anthropomorphes (e.g. Cowell & Stanney, 2005)

• Caractéristiques de l'avatar	• Recommandations/guide de conception
• Expression du visage	<ul style="list-style-type: none"> • Privilégier le recours à des expressions du visage telle la joie, la surprise ou encore l'intérêt ; à l'inverse, éviter des expressions telle la peur ou le dégoût • Animer l'avatar au moyen de mouvements de la tête et de clignements d'yeux • Afficher un sourire lors des phases appropriées de l'interaction (accueil, au revoir, offre du service, ...) • Paramétrage du sourire : 1 s pour sa mise en place, puis 2 s pour le retour à l'état initial
• Contact oculaire	<ul style="list-style-type: none"> • Eviter les clignements des yeux excessifs et le papillonnement du regard • Paramétrage des yeux : de 5 à 20 battements/minutes • Fixer celui qui parle pour exprimer le désir de prendre la parole / le désir de laisser la parole • Regarder ailleurs, détourner les yeux en l'absence de velléité à intervenir • Accroître le contact oculaire pour rajouter de l'intensité au message
• Paralangage	<ul style="list-style-type: none"> • Le débit de parole doit être modéré : de 5 à 70 mots/minute • Eviter un débit haché, peu coulant • La durée des pauses ne doit pas excéder 5 s

La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

Evaluation

- Mise au point de nouveaux périphériques sensori-moteurs pour l'interaction
 - Exemple : Approche adaptée de la psychophysique
 - Sujets « non-experts »
- Utilisabilité
 - Système complet
 - Sujets et Tâches plus ou moins « écologiques »
- Ergonomie
 - Système opérationnel
 - «vrais» utilisateurs finaux
 - Scenarios et situations « écologiques »

La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

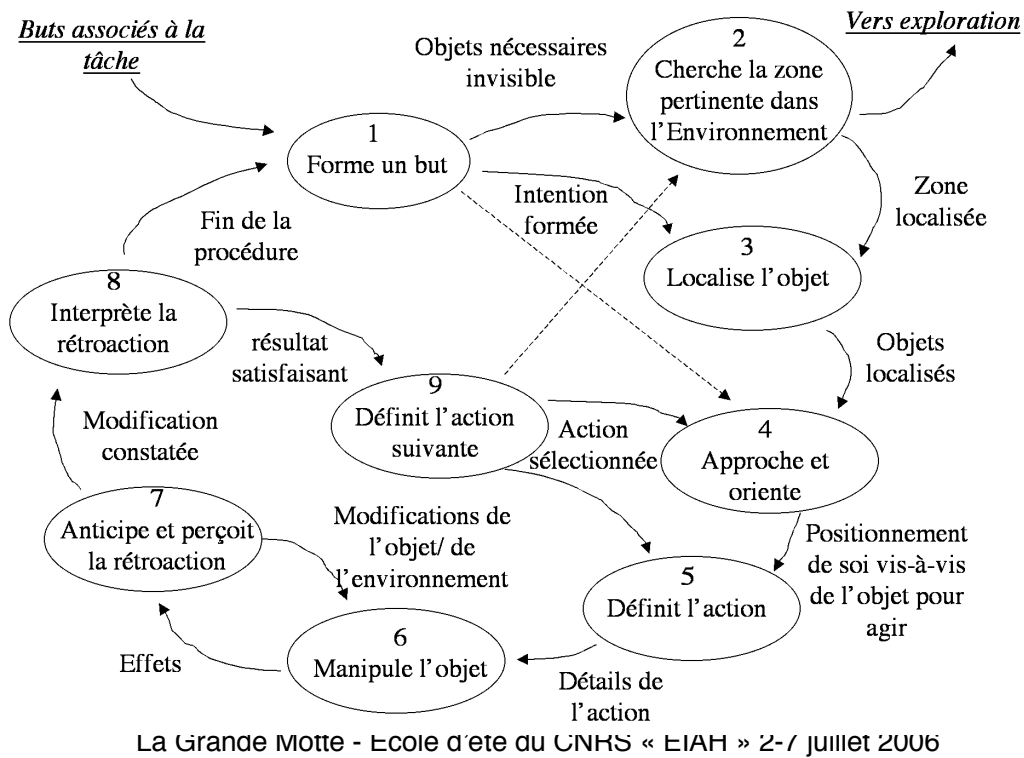
Méthodes d'évaluation sans utilisateurs

- Guidelines or standard verification
- Guided inspection
 - Cognitive walkthrough
 - Heuristics
 - Ergon. Criteria
- User's modeling/ cognitive simulation
 - Fitts law, Hicks law,
 - GOMS, KSLM, TAG, etc.
 - SOAR, ACT, etc



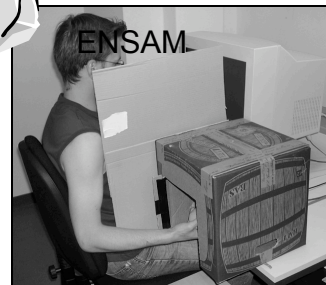
La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

Ex. adaptation de méthode « cognitive walkthrough » à l'interaction dans un EV(Sutcliffe & Kaur, 2002)



Méthodes d'évaluation avec utilisateurs

- Focus group
- Tested evaluations
- Psych. Inspired Exp.
- Wizard Oz
- Ethnographic obs.
- Scenario/ task-based
- Field studies



Indicateurs liés à la Performance

- Learning performance
- Goal/task performance - mesures “objectives”
 - number or % completed tasks and/or trials
 - deviations /reference solution
 - spatial accuracy
 - error rates
 - JND, etc.
- Goal/task performance - évaluation subjective
 - Expert judgement
 - Questionnaire
 - Lickert-type scale
 - Semi-structured interview, etc.

La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

Mesures d'efficacité & satisfaction

- Efficacité temporelle
 - tasks duration,
 - reaction times,
 - percentage of time for specific part of the interactions, etc.
- Efficacité en termes d'action
 - total number of needed actions,
 - suboptimal sequences or patterns of interaction,
 - number or % of unnecessary performed actions, etc
- Satisfaction, plaisir and preference
 - Questionnaires
 - Choice Task
 - Rate of use, etc.

La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

Autres indicateurs/mesures

- Charge cognitive/mentale
 - physiological measures
 - Questionnaire, auto evaluation,
 - expert judgement
 - double task paradigm,
 - observation of variations in activity modes and control
- Compréhension, mémorisation et apprenabilité du système/interaction
 - users' level of comprehension
 - users' ability to predict the system's behaviour
 - time needed to learn to easily interact
 - number of functions memorised in a limited time, etc

La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

Conclusions & perspectives

- Modèles des tâches et suivi des utilisateurs/ apprenants (APLG/ PERF RV2)
- Etudes à visée méthodologique
 - « Transférabilité » des Critères traditionnels de l'IHM aux EVA
 - Méthodes pour le recueil des besoins (e.g. Anastassova, Burkhardt, Mégard & Leservot, 2005)
 - Méthodes d'inspection (Sutcliffe & Kaur, 2002; Tromp, Steed & Wilson, 2003)
 - Organisation de recueils de recommandations (Bach, 2004 ; Tromp, 2001; Kaur, 1998 ; Gabbard & Hix, 1997)
 - Outils informatisés d'aide à l'évaluation (e.g. MAUVE-Multi-criteria Assesment of Usability for Virtual Environments, Stanney, Mollaghasemi, Reeves, Breaux, & Graeber, 2003; Patel et al, 2003)

La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

Conclusions & perspectives (2)

Recherches empiriques

- Transfert et validité écologique
- Articulation action/apprentissage dans le développement de l'expertise dans une situation d'immersion
- Représentation de l'utilisateur (avatar...)
- Rôles de variables telles que
 - Interactivité
 - Multimodalité
 - Immersion multisensorielle, réalisme
- Etc.

La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

Questions?

La Grande Motte - Ecole d'été du CNRS « EIAH » 2-7 juillet 2006

Références : Burkhardt, J.-M. (2005). Evaluation Methods in User-Centred Design of Virtual Environments: current practices and some perspectives in cognitive ergonomics. 2nd INTUITION workshop, 24-25 november, Senlis, France.

Evaluation Methods in User-Centred Design of Virtual Environments: current practices and some perspectives in cognitive ergonomics

Jean-Marie Burkhardt¹

(1) Université Paris 5, 45 rue des Saints-Pères, 75006 Paris
E-mail: jean-marie.burkhardt@univ-paris5.fr

Abstract

Keywords: Virtual Environments, user-centred design and evaluation, human factors, ergonomics

1 Introduction

The domain of Virtual Reality (VR) is living a shift in terms of design paradigm, moving from technology-driven approaches (mostly focused on 3D User-interfaces and interaction issues) to user-centred design approaches (considering users' goals in the broader scope of the Virtual Environment (VE) and its situations of uses). For a long time, VR-based prototypes were developed to address technological issues, providing only a limited number of functions to support users' generic activities (e.g. object manipulation, navigation). End-user needs remained unclear or failed to be satisfied and few applications were tested with real (future) users. Today, technology has gained in maturity and several industrial demonstrators have been documented, promoting VEs as serious candidates in various application domains: training, prototyping-testing, health and safety, etc.

Adopting a user-centred design approach requires the selection, the use and/or the development of appropriate methods at every stage of the VE engineering lifecycle. Some methods are devoted to the elicitation and the construction of end-users needs (brainstorming, interviews, observation-based task analyses, and questionnaires, see e.g. Garmer, Ylvén, & Karlsson, 2004).

This paper focuses on evaluation methods the field of Cognitive Ergonomics, i.e. the specialisation of ergonomics that is concerned with mental processes, such as perception, memory, reasoning and motor responses (IEA).

We attempt to review and to organise current evaluation methods related to user-centred design of Virtual Environments according to (a) their objective(s), (b) their scope, (c) their form and (d) their integration in the design life-cycle of VE development.

2 Objectives of evaluation in VE design

VE evaluation can be oriented toward rather different perspectives. For example, users focus primarily on the task environment while designers and analysts concern

Références : Burkhardt, J.-M. (2005). Evaluation Methods in User-Centred Design of Virtual Environments: current practices and some perspectives in cognitive ergonomics. 2nd INTUITION workshop, 24-25 november, Senlis, France.

themselves with the efficiency and functioning of the system (Foster & Franz, 1999). Evaluation may have different objectives depending on:

- what is to be evaluated: concepts, devices, interaction techniques, task-functions compatibility, etc.
- framework: theoretical, e.g. examining the effect of field of view on perceived presence and performance, or problem-driven, e.g. evaluating the usability of a specific interaction technique);
- step in the design lifecycle and attended outcomes : identifying problems (usability, task adequacy, accessibility, etc.), suggesting solutions, elaborating and refining design, comparing alternatives, validation etc;
- practical constraints: availability and expertise of people, time, etc.

Once objectives have been made clear, VE evaluation requires (a) the definition of the dimensions to be measured and (b) the selection of appropriate instruments to measure them. The following part present usual and specific user-centred dimensions of VEs.

3 Dimensions of evaluation

The following dimensions are typically evaluated during the design of VEs:

- *usefulness*, i.e. adequacy of functions and of system performance with users goals and context of uses ;
- *usability*, i.e. the extent to which the VE can be used by specified users to achieved specified goals with effectiveness, efficiency, and satisfaction in a specified context of use (ISO 9241-11);
- *accessibility*, i.e. the extend to which the system can be used by everyone, regardless of disabilities either related to functional limitations (visual, auditory, physical or cognitive) or situational limitations.
- *health and safety* concerns, involving prevention of accident, well-known side-effects of immersion (cyber-sickness, postural instability, eyes strains), etc.
- *acceptability*, i.e. adequacy with user motivation, culture and values.

Although the dimensions apply for all types of Information Technology Systems, they can have slightly different implementations for VEs due to (1) the focus on gestures and 3D (multimodal) interaction, and (2) the often vague definition of users' goals and activities.

Immersion, realism and anthropomorphism are probably the most specific dimensions of the domain of VE development:

- *immersion* should be understood in the restricted way of the "objective and quantifiable description of what the system provides (...) that is the extent to which devices and displays are capable of replicating the physiological sensations (Slater & Wilbur, 1997). Metrics have still to be developed for supporting the controlled investigation of its effects on users activity, interaction, and performance;
- *realism* is a recurrent matter of discussion, even if it is often ill-defined (Burkhardt, Bardy, & Lourdeaux, 2003; Stoffregen, Bardy, Smart, & Pagulayan, 2003). Practically, three mains dimensions should be differentiated (Burkhardt et al., 2003):
 - *perceptive fidelity*, i.e. the fidelity of users perceptive experience. This psychological dimension can be measured with discrimination and judgement-like tasks at several levels, e.g. at a mono-modal level (vision, sound,

Références : Burkhardt, J.-M. (2005). Evaluation Methods in User-Centred Design of Virtual Environments: current practices and some perspectives in cognitive ergonomics. 2nd INTUITION workshop, 24-25 november, Senlis, France.

haptics...), at the level of information structure distributed across many modalities, etc;

- *psychological fidelity*, i.e. the measure of the extent to which the VE produces a behaviour similar to those attended in the real situation, which in turn depends on the users expertise, tasks and the indices provided within the VE. Its evaluation can be only based on users' actual behaviour and performance;
- *Presence* i.e. the perception of elements of the EV as real or vivid, the suppression of space and time barriers and the illusion of non-mediation;
- *anthropomorphism* refers to the provision of (mostly visually) human-like characters representing artificial agents or distant users to cooperate with. Several sub-dimensions characterise this dimension : visual appearance of the character, its verbal, coverbal and para-verbal behaviours, etc (see e.g. Burkhardt, Perron, & Plénacoste, in press; Cowell & Stanney, 2005).

4 An overview of current VE evaluation methods

Evaluation methods can be categorized thanks to the fact that they rely (or not) on the empirical contribution of users.

4.1 Evaluation methods that require the participation of users

4.1.1 Focus group

Focus group {see\Bruseberg, 2001 #7) are formal and structured discussions conducted with multiple users to gather their opinion (e.g. satisfaction) and experience (e.g. usability issues) regarding the VE. Predominantly used in the early stages of design to address the definition of user requirements, this technique can be applied at the end of usability tests sessions, instead of/ complementary to individual interviews.

4.1.2 Empirical study/ user testing

Various forms of empirical studies are found in the literature. Some are clearly Both theoretical and problem-solving orientations may be found in the same study, however. Some studies address simple interaction devices and/or techniques, while other studies aim to address complex VE used in ecological tasks. Formative approach as well as summative approach are exploited. Formative evaluation means iteratively placing and observing representative users with the system in the usage context during evolving stages of the design to assess and improve its usability. In contrast, summative evaluation consists in measuring and subsequently comparing alternatives to determine which one is "better". The most current evaluation paradigms found for VEs evaluation are as follows.

Testbed evaluation { e.g \Bowman, 2002 #36} uses a set of tasks (simple generic tasks like, e.g. object manipulation, navigation) in simplified environments and combines them in a systematic manner to obtain an extended picture of the usability of interaction techniques. An adaptation of the method together with a set of supporting tools have been proposed for more complex configurations of VE interfaces(Figueroa, Bischof, Boulanger, & Hoover, 2005).

Références : Burkhardt, J.-M. (2005). Evaluation Methods in User-Centred Design of Virtual Environments: current practices and some perspectives in cognitive ergonomics. 2nd INTUITION workshop, 24-25 november, Senlis, France.

Psychological- inspired experiments consist in adapting experimental paradigms borrowed from the field of Psychology (especially psychophysics) to characterize HCI concepts or interaction techniques performance and usability by the means of typical human parameters (IC, PSE, JND etc).

Wizard Oz and other system simulation techniques are based on the idea of providing the users with a VE interfaces that works by having someone behind who generate and control the system responses(e.g. Buisine, 2005). This technique enable to early anticipate on the usability difficulties that users will face before the technology is fully working.

Ethnographic observation of subjects interacting with the VE (e.g.Spagnoli, Varotto, & Mantovani, 2003). In this approach, one subject is watched and interviewed during s/he is using the system.

Scenario / task-oriented approach i.e. experiments with real practitioners, performing realistic tasks, using their common tools with some part of their usual environment. This type of experiment is mostly developed in the domain of training and education, e.g. (e.g. Adams & Lang, 1995) and far less in other application domains.

4.1.3 Field studies

Field studies focus on work/activity in a natural environment. The favoured methodology is observation from within the workplace, completed with the collection of "natural" data, such as spontaneous dialogues, verbal and textual productions, drawings and information collected by individuals in the context of their activity, etc.

One can distinguish between system-oriented and activity-centred studies. The former studies (e.g. Johnson, Moher, Ohlsson, & Leigh, 2001) are oriented towards the evaluation of the system usability and its modes of uses. In contrast, activity-centred studies are mostly centred on the precise analysis of the users activities at qualitative and/or quantitative levels (e.g. Frejus, 1998).

4.2 Evaluation methods with no user

4.2.1 Guidelines or standards verification

These methods consist in assessing whether the VE under consideration (or at least parts of its interface) conforms to specified design standards or guidelines. There are currently very few guidelines and standards adapted to VEs (but see Cedric Bach, 2004; Gabbard & Hix, 1997; Kaur, 1998) and they concern essentially usability. It is suggested, however that previous ergonomics guidelines can be at least partly used, in particular those developed for multimodality, Haptics and other recent HCI paradigms (e.g. Carter & Fourney, 2005; Gabbard & Hix, 1997)).

4.2.2 Guided Inspection

Cognitive Walkthrough (Sutcliffe & Kaur, 2000; J. Tromp, Steed, & Wilson, 2003) is based on the process of envisioning the user's route through an early concept or prototype (Rubin, 1994) in order to find potential usability problems.

Ergonomics criteria-based inspection (Cedric Bach, 2004; Cédric Bach & Scapin, 2003) consist in the use of a structured checklist of 20 categories of usability problems

Références : Burkhardt, J.-M. (2005). Evaluation Methods in User-Centred Design of Virtual Environments: current practices and some perspectives in cognitive ergonomics. 2nd INTUITION workshop, 24-25 november, Senlis, France.

(so-called Ergonomics Criteria) related to various perceptual and cognitive dimensions of the users interaction with the virtual environment .

Heuristics inspection is a low-cost technique consisting in a usability expert scrutinizing the interface and evaluating each element against a list of established usability principles (so-called heuristics by Nielsen) (1994). Adaptation of the heuristics to VE have been recently proposed (Sutcliffe, Gault, Fernando, & Tan, soumis à publication; J. Tromp et al., 2003; J. G. Tromp, 2001). These authors generally agreed that further development is still needed for the technique to gain in efficiency.

4.2.3 *User's modeling and cognitive simulation*

Although no publication on the validation of the use of cognitive architectures (e.g. Kieras & Meyer, 1997) and models to evaluate usability of VEs, it has been nevertheless proposed as a possible direction to engage (Byrne, 2003).

4.3 **Typical indicators involved in VEs evaluations**

There are many classifications proposed to report on measurement in HCI evaluation studies. One can roughly describe the following categories .

Objective task performance. Many indicators fall in this category, which is one that should be privileged. Among all of them, we can cite: number or percentage of completed tasks, deviations from the reference solutions, spatial accuracy, error rates, Just Noticeable Difference etc.

Subjective evaluation of performance. These data are based on the subjective reports by users on their perception and/or judgement on their own performance. Indicators are for example responses to questionnaire, lickert- scale, semi-structured interviews etc.

Speed and action efficiency. This category of indicators deals with the time and the number of action to be performed by users to achieve their goals. Typically, we can have on the one hand, indicators like task durations, reaction times, percentage of time for specific part of the interaction, etc. In terms of action, we have for example the total number of needed actions, the search for sequences or patterns of interaction, the number of unnecessary performed actions, etc.

Cognitive load. Typically, cognitive workload is an important design issue in complex and information rich systems. Although the concept has some definition problems, several indicators/ instruments have been developed for its assessment, ranging from questionnaires (e.g. NTLX) to auto evaluation, expertise, double task paradigm, physiological measures and analysis of the variations in activity.

Comprehension, memorisation and learnability. Once again, a large amount of techniques and indicator have been used, like the users' level of comprehension of the system, the users' ability to predict the system's behaviour, the time needed to learn to easily interact with the VE, the number of functions memorised in a limited time, etc.

Satisfaction, enjoyment and preference. This latter category of indicators is usually collected with questions administered either by the way of questionnaires or by decision tasks. However, data from field studies like e.g. Rate of use can also provide objective measures of preference.

All the categories of measure, indicators and correlated techniques should be usually adapted and mixed to avoid their specific biases and to get a more accurate picture of the users-virtual environment interaction.

Références : Burkhardt, J.-M. (2005). Evaluation Methods in User-Centred Design of Virtual Environments: current practices and some perspectives in cognitive ergonomics. 2nd INTUITION workshop, 24-25 november, Senlis, France.

5 **Conclusion**

Empirical evaluations that investigated systematically human-factors are actually under-represented, compared to the continuous proliferation of brand-new techniques and displays. In addition, these studies make often use of very fine-grain (e.g. pointing, object selection) simple (i.e. elementary goals with no external dependencies) tasks (as compared to with real-tasks for real users like e.g. maintenance, art design, architecture sketching) associated to ad-hoc stimuli (e.g. blocks of different sizes and location) presented in simplified environments (e.g. a texture). Human performance related to interaction techniques (essentially vision-based metaphors) have been investigated and in some ways theorised in travel/ navigation tasks and in virtual object selection/manipulation tasks. Interaction techniques that combine haptics and vision have been also investigated, mostly by adapting simple procedures from psychophysics (e.g. discrimination or decision tasks). Experimental simplifications are interesting and important for studying and/or controlling the impact of the many factors that might affect human perception and action in Virtual Environments. This is particularly important to bring a technique from an initially immature idea to their tuned version to be integrated within (quasi-) industrial systems with real users. A supplementary advantage is that there is no need to recruit task-domain experts as subjects since no particular expertise in the task is usually required (or even actually exists out of the laboratory). However, simplifying the tasks and the environments in which the subjects have to perform presents simultaneously the risk of investigating situations actually far from those where real users as experts are dealing with their real task.

Indeed, no method is better in absolute terms. Rather, some methods can be more or less adapted to specific design phases, to the level of system development and to the particular constraints of the design project.

6 **References**

- Adams, N., & Lang, L. (1995, may 1995). VR improves Motorola Training Program. *AI Expert*, 13-14.
- Bach, C. (2004). *Elaboration et validation de critères ergonomiques pour les interactions Homme-Environnements virtuels*. Unpublished PhD, Université de Metz, Metz.
- Bach, C., & Scapin, D. (2003). *Adaptation of Ergonomic Criteria to Human-Virtual Environment*. Paper presented at the INTERACT 2003, Zurich, Switzerland.
- Buisine, S. (2005). *Conception et évaluation d'agents conversationnels multimodaux bidirectionnels*. Université Paris 5, Paris.
- Burkhardt, J.-M., Bardy, B., & Lourdeaux, D. (2003). Immersion, réalisme et présence dans la conception et l'évaluation des environnements virtuels. *Psychologie Française*, 48, 35-42.
- Burkhardt, J.-M., Perron, L., & Plénacoste, P. (in press). Concevoir et évaluer l'interaction utilisateur-environnement virtuel. In P. Fuchs & G. Moreau (Eds.), *Le traité de la réalité virtuelle* (Vol. 2). Paris: Presse de l'école des mines de Paris.

Références : Burkhardt, J.-M. (2005). Evaluation Methods in User-Centred Design of Virtual Environments: current practices and some perspectives in cognitive ergonomics. 2nd INTUITION workshop, 24-25 november, Senlis, France.

- Bruseberg, A., & MacDonagh-Philp, D. (2001). Focus group to support the industrial/product designer : a review based on current literature and designers feedback. *Applied Ergonomics*, 33, 27-38.
- Byrne, M. D. (2003). Cognitive architecture. In J. Jacko & A. Sears (Eds.), *The Human-Computer Interaction Handbook: Fundamentals, Evolving Technologies and Emerging Applications* (pp. 97-117). Mahwah, NJ: L. Erlbaum.
- Carter, J., & Fourney, D. (2005). *Research based tactile and haptic interaction guidelines*. Paper presented at the Guidelines on Tactile and Haptic Interactions, October 24-26, Sakatoon, Sakatchewan CA.
- Cowell, A., & Stanney, K. M. (2005). Manipulation of non-verbal interaction style and demographic embodiment to increase anthropomorphic computer character credibility. *International Journal of Human-Computer Studies*, 62, 281-306.
- Figueroa, P., Bischof, W. F., Boulanger, P., & Hoover, H. j. (2005). Efficient comparison of platform alternatives in interactive virtual reality applications. *International Journal of Human-Computer Studies*, 62, 73-103.
- Frejus, M. (1998). *Evaluation of a virtual environment-based training tool through trainer-trainees interaction analysis*. Paper presented at the ECCE-9, University of Limerick, Ireland August 24-26.
- Gabbard, J., & Hix, D. (1997). *A taxonomy of usability characteristics in virtual environments*: Technical Report Office of naval research, Virginia polytechnics Institute and State University.
- Garmer, K., Ylvén, J., & Karlsson, I. C. M. (2004). User participation in requirements elicitation comparing focus group interviews and usability tests for eliciting usability requirements for medical equipment: a case study. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 33(2), 85-98.
- Johnson, A., Moher, T., Ohlsson, S., & Leigh, J. (2001). *Exploring multiple representations in elementary school science education*. Paper presented at the IEEE Virtual Reality Conference, Yokohama, Japan 13-17 march 2001.
- Kaur, K. (1998). *Designing virtual environments for usability*. Unpublished Phd thesis, City University of London, London.
- Kieras, D. E., & Meyer, D. E. (1997). An overview of the EPIC architecture for cognition and performance with application to human-computer interaction. *Human-Computer Interaction*, 12, 391-438.
- Nielsen, J. (1994). Heuristic evaluation. In J. Nielsen & R. L. Mack (Eds.), *Usability inspection methods*. NY: John Wiley & sons.
- Rubin, J. (1994). *Handbook of usability testing. How to plan, design and conduct effective tests*. New York: Wiley & sons.
- Slater, M., & Wilbur, S. (1997). A framework for immersive virtual environments (FIVE): Speculations on the role of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(6), 603-616.
- Spagnoli, A., Varotto, D., & Mantovani, G. (2003). An ethnographic, action-based approach to human experience in virtual environments. *International Journal of Human-Computer Studies*, 59, 797-822.
- Stoffregen, T. A., Bardy, B. G., Smart, L. J., & Pagulayan, R. J. (2003). On the nature and evaluation of fidelity in virtual environments. In L. J. Hettinger & M. W.

Références : Burkhardt, J.-M. (2005). Evaluation Methods in User-Centred Design of Virtual Environments: current practices and some perspectives in cognitive ergonomics. 2nd INTUITION workshop, 24-25 november, Senlis, France.

- Hass (Eds.), *Psychological issues in the design and use of virtual environments* (pp. 111-128). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Sutcliffe, A., Gault, B., Fernando, T., & Tan, K. (soumis à publication). Usability problems with manipulation tasks in CAVE virtual environments.
- Sutcliffe, A., & Kaur, K. (2000). Evaluating the usability of virtual reality user interfaces. *Behaviour & Information Technology. Behaviour and Information Technology*, 19, 415-426.
- Tromp, J., Steed, A., & Wilson, J. R. (2003). Systematic usability evaluation and design issues for collaborative virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 12, 241-267.
- Tromp, J. G. (2001). *Systematic usability design and evaluation for collaborative virtual environments*. Unpublished PhD Thesis, University of Nottingham, Nottingham.

Immersion, Réalisme et Présence dans la conception et l'évaluation des Environnements Virtuels (Immersion, Realism and Presence in the design and evaluation of Virtual Environments)

Jean-Marie Burkhardt (1,2)

(1) Projet EIFFEL-Institut National de Recherche en Informatique et Automatique
Domaine de Voluceau, Rocquencourt BP 105 78 153 Le Chesnay cedex

Tel. 01 39 63 50 26

Email jean-marie.burkhardt@inria.fr

(2) Laboratoire d'Ergonomie Informatique -Université Paris V

45, rue des Saints-Pères

75 006 Paris

Tel. 01 42 86 21 35

Email jean-marie.burkhardt@ergo-info.univ-paris5.fr

Benoit Bardy

Université Paris XI & Institut Universitaire de France

Centre de Recherches en Sciences du Sport

Bâtiment 335, 91405 Orsay

Tel : 01 69 15 43 18

Email : benoit.bardy@staps.u-psud.fr

D. Lourdeaux

Centre de Robotique, École des Mines de Paris

60, boulevard Saint Michel, 75272 Paris Cedex 06

Tel. 01.40.51.94.97

Email domitile.lourdeaux@ensmp.fr, <http://www.caor.ensmp.fr/~domitile>

Résumé : Cet article concerne la conception et l'évaluation d'environnements virtuels. Après un bref historique des recherches, nous discutons de trois dimensions considérées comme fondatrices du domaine: l'immersion, le réalisme, et la présence. Les limites des études sont le manque de positionnement clair sur ces trois notions et l'ignorance des théories et méthodes sur la cognition. Deux acceptations sont répertoriées pour l'immersion et cinq acceptations permettent de couvrir les notions de réalisme et de présence. Nous concluons sur des implications pour le développement des environnements virtuels.

Mot Clefs : ergonomie, réalité virtuelle, cyberpsychologie

Abstract : This paper reports on the design and evaluation of Virtual Environments. After a short the history of the domain, we discuss three dimensions considered as essential for Virtual Environments: immersion, realism and presence. Previous studies are limited because the clear definitions of the dimension are lacking and the theories and methods about human behaviour are mostly ignored. Two acceptations are distinguished for immersion, and five acceptations for realism and presence. We give some implications for the design of Virtual Environments.

Key words : ergonomics, virtual reality, cyber-psychology

I Introduction

Les Environnements Virtuels (EV) constituent des systèmes interactifs particuliers visant à permettre à un ou plusieurs utilisateurs d'interagir avec la simulation numérique généralement réaliste, d'objets et de scènes en trois dimensions, par le biais d'un ensemble de techniques informatiques couvrant une ou plusieurs modalités sensorielles (vision, toucher, kinesthésie ouïe,...). Souvent présentée comme l'aboutissement ultime des interfaces de manipulation directe, cette technologie affiche l'ambition de faire " disparaître " l'interface afin de redonner un mode d'interaction " naturel " aux utilisateurs. Fuchs et Moreau (2003) parlent à ce propos d'interfaces comportementales, soulignant ainsi l'orientation des recherches vers la conception de systèmes " visant à exploiter un comportement humain, naturel et sans acquis préalable".

Les notions *d'immersion*, de *réalisme* et de *présence* sont trois dimensions-clefs de la recherche et de l'application dans le domaine des EV, malgré l'ambiguïté, les recouvrements de sens et l'absence de définition formelle qui caractérisent encore leurs usages. Une dichotomie usuelle oppose, par exemple, les systèmes dits " immersifs "(visio-casque, salle immersive, etc.) avec ceux " non immersifs " (écran, souris), avec l'idée que le degré d'immersion est un paramètre important du réalisme de l'interaction et de l'*utilisabilité* du système. De même, la dimension du *réalisme* qualifie fréquemment les EV, voire constitue l'une des finalités de leur conception. Par exemple, le *réalisme* est le premier critère du projet européen VR for Europe (Syseca, 1998). Toutefois, il s'agit d'une notion mal définie, tantôt référant à une identité métrique ou perceptive entre l'espace réel et l'espace artificiel engendré par l'EV, tantôt référant à des ressentis subjectifs des utilisateurs. Enfin, la notion de *présence* est associée de différentes façons à l'expérience perceptive et cognitive de l'utilisateur dans le cours de son activité en EV. La recherche d'un degré élevé de *présence* (Stanney, 1998) caractérise l'orientation de nombreux travaux, notamment avec l'idée de faciliter la performance ou l'apprentissage des utilisateurs.

La recherche technologique est aujourd'hui plus avancée que l'étude des aspects cognitifs. Hormis quelques thématiques suivies en psychologie et en ergonomie (mal des simulateurs, pointage et localisation spatiale, navigation dans l'espace, etc.), les travaux sont souvent la description de solutions sans réelle validation empirique. Lorsqu'elles existent, les évaluations avec des utilisateurs s'appuient majoritairement sur une psychologie naïve, et souffrent par conséquent d'un manque de fondement théorique, d'une valeur écologique faible, et de l'absence de réplication. D'un autre côté, les psychologues et les ergonomes connaissent mal les concepts formels ou pragmatiques structurant historiquement ce champ, de même que les propriétés et les limites des technologies associées aux EV, sous-estimant ou parfois surestimant leur valeur potentielle. Il y a là une opportunité de recherche et de collaboration pour toutes ces disciplines.

Objectif et organisation de l'article

Cet article propose une contribution à la recherche sur les EV sous la forme d'une analyse des notions d'immersion, de réalisme et de présence. Ce travail s'appuie sur l'identification et la tentative de formalisation des principales acceptions rencontrées, un premier recensement des données empiriques, et quelques implications en termes de méthodologie et d'indicateurs utilisés. La première partie présente la conception d'EV et l'historique des recherches ergonomiques et psychologiques sur cette thématique. La seconde partie traite des notions d'immersion, de réalisme et de présence dans la recherche actuelle. Nous concluons sur les directions de recherche.

II La conception des Environnements Virtuels

Panorama du domaine

Né à la fin des années 60 et au début des années 70, ce domaine de recherche s'est d'abord centré sur le développement de périphériques et d'interfaces multimodales de navigation et de manipulation dans l'espace à trois dimensions. Certains tels les visio-casques (aussi appelés HMDs pour Head-Mounted Displays) ou les gants de manipulation (Data-Glove) ont été popularisés par les médias. Il faut attendre les années 90 pour voir apparaître les premières applications réelles. En Europe, cinq domaines concentrent l'essentiel des développements (Syseca, 1998): la construction automobile ; l'aviation et l'industrie aérospatiale ; la médecine ; l'industrie nucléaire ; l'industrie chimique. Les usages réels ou envisagés sont la démonstration, la conception, la formation et l'apprentissage, la recherche, le diagnostic et l'exposition thérapeutique.

Tous les EV se décomposent en trois parties fonctionnellement distinctes : les dispositifs de présentation d'information, les dispositifs d'entrée d'information et le moteur de réalité virtuelle proprement dit. Les premiers regroupent des dispositifs variés de retour visuel (grand écran, casque, lunettes stéréoscopiques, etc...), de retour proprioceptif et cutané (toucher, chaleur, etc...) et de retour sonore (casque, son 3D spatialisé, etc.). Les seconds sont essentiellement les dispositifs de capture de position et de mouvement (capteurs, gant, combinaison, etc...), et de dispositifs d'entrée sonore (reconnaissance vocale, etc...). Hors du laboratoire, les retours sonores, haptiques et olfactifs sont peu présents. Le moteur de Réalité Virtuelle correspond au système matériel et aux logiciels de gestion et de mise à jour de la présentation en fonction des entrées de l'utilisateur. Il comprend généralement une base de données modélisant la scène virtuelle, un modèle des interactions et une représentation de l'utilisateur. Pour un éclairage des aspects technologiques, voir Fuchs et Moreau (2003).

Ergonomie, Psychologie, conception et utilisation des Environnements Virtuels

La conception des EV se fonde à l'origine sur la collaboration active de nombreuses disciplines : robotique, infographie, informatique de la Communication Homme-Machine, informatique temps réel, ergonomie physique et physiologique, et plus récemment psychologie et ergonomie cognitive.

Les EV ont constitué, dès le départ, un objet de recherche à part entière pour l'Ergonomie et les disciplines des Facteurs Humains, avec l'objectif de contribuer à la conception d'EV mieux adaptée aux tâches, aux besoins et aux caractéristiques des utilisateurs. Les premières recherches ergonomiques ont porté, d'une part, sur les troubles consécutifs à l'exposition aux premiers EV : *mal du simulateur*, *troubles de l'orientation* (vertiges ou instabilité posturale), et *troubles oculomoteurs* (fatigue visuelle, diplopie, etc...) Elles ont porté, d'autre part, sur l'ergonomie physique des matériels et des dispositifs manuels d'interaction (poids et encombrement des visio-casques, aménagement des zones de contact). Par la suite, des collaborations avec une ergonomie plus psychologique se sont amorcées. Elles ont d'abord porté sur les caractéristiques de la perception et de l'action humaine (modèles et paradigmes psychophysiques). Plus récemment, l'ergonomie et la psychologie cognitive sont aussi appelées à collaborer pour l'analyse des besoins, l'analyse des interactions, la conception de dialogues plus simples et efficaces pour les utilisateurs et l'évaluation (par ex. Frejus, 1998 ; Lapointe & Robert, 2000). L'idée d'utiliser les EV comme un outil pour l'Ergonomie est plus récente (par ex. Burkhardt, 2003).

Les EV ont d'abord été considérés en Psychologie comme des outils pour l'expérimentation, plutôt que comme un objet de recherche en soit. La Psychologie expérimentale les utilise par exemple pour manipuler certains paramètres de la boucle perception-action (Péruch &

Gaunet, 1998). En Psychologie clinique et pathologique, des EV sont utilisés pour contrôler l'exposition des sujets à des stimuli, aux fins d'étude, de diagnostic et de thérapie (par ex. Riva, 1998). Une exception notable réside dans la lignée des travaux sur la notion de présence (ou télé-présence) considérée par de nombreux auteurs comme une propriété particulière de la psychologie de l'immersion dans les EV (par ex. Stanney, 1998). Une seconde exception concerne les recherches sur les EV éducatifs (par ex. Johnson, Moher, Ohlsson, & Leigh, 2001).

Aujourd'hui, les rapports entre l'ergonomie, la psychologie, et les disciplines technologiques de la recherche en ingénierie des EV vont au-delà de leur simple instrumentalisation pour la conception. Les EV peuvent être considérés comme des outils pour la recherche en même temps que des objets de recherche en eux-même, du fait qu'ils mettent en œuvre des situations perceptives et cognitives inédites. Développer cette recherche implique la constitution d'une communauté autour de cadres théoriques et de références paradigmatiques connus si ce n'est partagé, entre les différentes disciplines associées à cette technologie. La discussion qui suit sur les notions d'immersion, de réalisme et de présence est élaborée dans cet esprit.

III Notions d'immersion, de réalisme et de présence dans le contexte des Environnements Virtuels

Notion d'immersion

Le terme d'immersion se retrouve dans des formules couramment utilisées dans la communauté comme : immersion dans un monde virtuel, interfaces et systèmes immersifs, utilisateur immergé etc... La littérature exhibe des acceptions variées sur le plan du contenu et de la précision formelle. Nous en avons retenu deux principales, depuis ce qui nous semble être l'usage courant jusqu'à une définition plus opérationnelle pour la recherche¹.

Acception 1. Dans le langage courant, le terme d'immersion est compris comme *l'exposition de l'utilisateur à un EV au moyen de dispositifs occultant en partie la perception* (surtout visuelle) de l'environnement alentours, pour afficher en lieu et place une image du monde virtuel (visio-casque, salle immersive de type CAVE, etc.). Par extension, on parle d'immersion auditive, haptique, sensorielle etc. Au-delà d'un caractère informel, cette acception comporte deux ambiguïtés. D'une part, deux sémantiques différentes coexistent :

- a) *l'immersion comme l'action d'exposer l'utilisateur à un environnement simulé numériquement,*
- b) *l'effet avéré ou supposé de cette exposition sur l'utilisateur.*

D'autre part, en se focalisant sur l'aspect d'exposition, cet usage courant tend à centrer le problème sur la recréation d'une image artificielle proche de la situation réelle de référence, et à occulter les éventuelles interactions avec l'information persistante liée à l'environnement physique réel de l'utilisateur.

Acception 2. Le développement d'investigations empiriques en termes d'effet de l'immersion sur la cognition et l'apprentissage, nécessitera de définir de mieux en mieux le concept et de préciser les paramètres de sa mesure. Une définition plus formelle de l'immersion correspondrait ainsi au degré et à la qualité avec lesquels l'interface du système contrôle les

¹Il existe en outre un usage spécifique du terme dans la méthodologie de conception d'EV proposée par Fuchs (Fuchs, et al., 2003). Dans cette méthodologie, les termes d'immersion et d'interaction (I2) représentent trois niveaux du problème traité durant le processus de conception d'un EV : la spécification fonctionnelle de l'application, la composante cognitive de l'interaction, et l'interfaçage de niveau sensori-moteur.

entrées sensorielles pour chaque modalité de perception et d'action ; l'immersion peut alors se décrire dans les termes des dispositifs logiciels et matériels particuliers utilisés (Burkhardt, Lourdeaux & Fuchs, 1999). Le degré d'immersion se caractériserait alors au moins par :

- a) le sous-ensemble des modalités mises en œuvre dans l'interaction ;
- b) les propriétés (degré de complétude, qualité, paramètres du signal, etc...) des dispositifs d'interaction pour chacune des modalités visées ;
- c) la cohérence interne et la latence globale de l'information et des réactions délivrées en temps réel par le système ;
- d) les propriétés de l'environnement physique dans lequel se déroule l'expérience.

Cette acception renvoie à la notion théorique analogue de "fidélité du stimulus" (Stoffregen, Bardy, Smart, & Pagulayan, 2003) proposée pour être un indicateur de la distance entre le monde physique et sa simulation. Le concept d'immersion ainsi précisé ouvre vers la construction de métriques qui permettraient de quantifier, comparer et étudier systématiquement les effets de l'immersion sur la cognition, les performances et la satisfaction des utilisateurs.

Données empiriques sur l'immersion

La cohabitation d'acceptions variées rend difficile la lecture des résultats éparses. Le bénéfice de l'immersion n'a pas réellement de confirmation empirique. Quelques études expérimentales ont cherché à évaluer l'effet de systèmes immersifs (généralement constitué de systèmes de visualisation en 3D, souvent au moyen d'un casque ou de lunettes) en termes d'efficacité pour l'apprentissage, par comparaison avec d'autres environnements non immersifs (généralement de type micro-ordinateur présentant des images en 2 dimensions, voire des modes plus traditionnels d'enseignement). Par exemple, Adams et Lang (1995) observent une supériorité de la condition immersive, mais notent qu'elle découle probablement de la plus grande motivation des utilisateurs. Byrne (1996) a étudié l'effet de l'immersion et de l'interactivité sur l'apprentissage dans le domaine de la physique moléculaire ; l'auteur observe que seul le facteur interactivité du matériel a un effet positif. S'intéressant à l'effet de l'immersion sur l'activité cognitive, Morineau (2000) observe une dégradation de la performance à des épreuves issues des tests piagetiens. Entre autres hypothèses, l'immersion dans l'EV pourrait avoir pour effet de distraire l'attention des sujets du contenu à apprendre ou à traiter, au moins dans les premières expositions (Gay, 1994 ; Morineau, 2000). Cependant, la distraction diminuerait avec l'augmentation du nombre d'expositions (Morineau, 2000).

Notions de réalisme et de présence

Le réalisme n'est pas toujours un objectif pertinent. Pour les EV de formation, par exemple, la situation d'apprentissage autorise une déformation ou une exagération de la réalité pour faire mieux comprendre la complexité de la situation (Burkhardt, *et al.* 1999). Parfois également, les situations simulées sont abstraites et n'ont pas de représentation dans la réalité : fission nucléaire, écoulement dynamique. Le succès de la notion de réalisme traduit malgré tout la nécessité, dans beaucoup de situations (conception, expérimentation, simulation, etc...), de devoir décrire de façon fine et précise, les rapports entre le simulacre engendré par l'EV et des aspects du monde réel. Le recours à cette notion est problématique de par son caractère intuitif et singulier, dont la conséquence est que personne ne partage la même définition ni les mêmes critères. De plus il existe un recouvrement avec la notion de présence.

Cinq acceptions coexistent avec des conséquences méthodologiques pour la conception et l'investigation expérimentale. La première traduit l'usage courant de la notion de réalisme. La seconde acception est un paradigme de conception fondé sur la construction des simulations à

partir de lois ou de modèles scientifiques concernant la perception, la physique, etc... Les trois suivantes sont trois niveaux d'analyse possibles des effets psychologiques liés à l'exposition à un EV : la fidélité perceptive, la fidélité psychologique, et enfin l'illusion du réel ; nous assimilons cette dernière à la notion de présence telle que celle-ci semble majoritairement comprise.

Acception 1. La conception d'un EV amène inmanquablement à évoquer le réalisme, soit en termes d'objectif à atteindre, soit en termes de critères pour l'évaluation ou la comparaison. Le réalisme est ainsi une demande spontanée des utilisateurs invités à s'exprimer sur les améliorations qu'ils souhaiteraient pour un EV. Le réalisme constitue aussi un objectif plus ou moins explicite du cahier des charges de nombreux EV. Cet usage courant traduit souvent un jugement personnel, c'est-à-dire une évaluation subjective du degré de la (1) ressemblance ou de la (2) crédibilité d'une situation/ d'un objet pour un observateur donné. Les critères de cette estimation sont généralement non explicites, peu définis. Trois facteurs contribuent aussi à la diversité des échelles et critères spontanément associés à l'idée de réalisme :

- le grain de l'objet évalué (ex. une image, une réaction, un comportement, une simulation pour l'apprentissage) ;
- le rôle/statut de l'observateur (ex. : utilisateurs vs concepteur) ;
- la tâche, selon qu'elle consiste à évaluer la ressemblance (réalisme d'apparence) ou la crédibilité (illusion d'une « réalité » qui n'existe pas).

Acception 2. La notion de réalisme fait parfois référence à l'appariement recherché entre la construction de la simulation et les modèles biologiques/physiologiques de la perception (Carr, 1995), ou les lois de la physique. Ainsi, un EV pourra être qualifié de réaliste s'il intègre des lois ou des modèles formels de la physique, de l'évolution ou du comportement humain. Dans le domaine de la perception visuelle en particulier, la notion de réalisme est vu par certains auteurs comme la modélisation des processus perceptifs naturels de la vision, en essayant de faire coller à ces mécanismes les méthodes permettant de calculer une scène visuelle tridimensionnelle (Christou & Parker, 1995, p. 53).

Acception 3. La *fidélité perceptive* est une autre acception de la notion de réalisme qui coexiste avec la précédente. Pour Carr (1995), le réalisme fait alors référence à la création d'une expérience perceptive qui serait crédible si elle était vécue dans le monde réel. Cette définition correspond à l'idée de "fidélité subjective de l'expérience" (Stoffregen, *et al.* 2003), les auteurs soulignant que ce niveau de fidélité implique un jugement de ressemblance sans qu'il y ait doute ou illusion sur la nature artificielle du simulacre. Sur le plan de la pratique, la fidélité perceptive peut être déclinée à plusieurs niveaux :

- un niveau élémentaire considérant chaque modalité d'interaction avec l'utilisateur de façon isolée (visuelle; sonore; tactile; haptique...);
- un niveau global considérant la structure d'information répartie à travers les différentes modalités considérées dans l'EV (Stoffregen & Bardy, 2001).

En outre, un lien entre les acceptions 2 et 3 est souvent postulé. Ainsi, un processus de construction de la simulation proche des mécanismes perceptifs « naturels » s'accompagnerait d'un plus haut degré de fidélité de l'expérience subjective (Christou & Parker, 1995 ; Carr, 1995) ; toutefois, l'ampleur et le caractère systématique d'un tel lien est une question de recherche. Typiquement, l'évaluation de cette dimension du réalisme pourrait porter sur la capacité des sujets à discriminer un stimulus réel de son simulacre, dans une tâche de discrimination perceptive.

Acception 4. Une autre acception du réalisme correspond à la notion de *fidélité*

psychologique, déjà abondamment discutée dans le domaine de l'utilisation de la simulation, notamment à visée de formation (e.g. Leplat, 1997 ; Grau, Doireau & Poisson, 1998 ; Patrick, 1992 p. 497-502), et qui commence à être discutée dans le cadre de la conception d'EV (Burkhardt, 2003 ; Stoffregen, *et al.*, 2003). La fidélité psychologique se définit comme « la mesure selon laquelle le simulateur produit un comportement semblable à celui exigé dans la situation réelle » (Leplat, 1997, p. 173), ou en d'autres termes, «la proportion dans laquelle la tâche simulée engendre une activité et des processus psychologiques identiques à ceux de la tâche réelle » (Patrick, 1992, p. 487). Stoffregen *et al.* (2003) utilisent la notion similaire de "fidélité de l'action" pour traduire la relation entre la performance dans le monde réel et la performance dans l'EV. Une conséquence importante de cette définition est que l'évaluation de ce niveau de la fidélité passe obligatoirement par l'analyse des performances et des comportements de sujets ; il n'est pas accessible de façon directe par l'introspection ou l'évaluation subjective. Spécifier a priori et prédire le niveau de la fidélité psychologique est une question de recherche importante (pour l'efficacité des systèmes ET pour la connaissance des déterminants de l'activité humaine) non complètement résolue (Patrick, 1992, p. 498)

Acception 5. La notion de réalisme est parfois enfin comprise comme l'illusion d'une réalité qui n'existe pas (Carr, 1995 ; Stoffregen, *et al.*, 2003). Cette illusion est généralement associée à la notion de « présence » (Stoffregen, *et al.*, 2003 ; Burkhardt, 2003). Cette acception diffère des précédentes qui traitaient de qualités de la simulation dans l'EV, le caractère virtuel et simulé étant connu par le sujet. Chez un certain nombre d'auteurs (ex. : Draper, Kaber, & Usher, 1998), la *présence* désigne ainsi l'effet de faire percevoir comme réels ou vivants les objets, événements ou personnages avec lequel l'utilisateur interagit dans l'EV (Burkhardt, 2003). Une acception proche a trait à la déformation de la perception de l'espace chez les utilisateurs ; Lombard et Ditton (1997) relèvent trois types de déformation : l'illusion de quitter l'espace réel et d'être transporté dans l'espace engendré par l'EV, l'illusion que l'espace engendré par l'EV s'introduit et envahit l'espace réel, l'illusion d'être proche et de partager un espace commun avec des utilisateurs distants.

Quelques données empiriques sur le réalisme et la présence

Les rares études expérimentales sur le réalisme ne montrent pas de supériorité en termes d'apprentissage. Une série d'expériences récentes (Moreno, Mayer, Spires & Lester, 2001) montre que le degré de réalisme de la représentation visuelle n'a pas d'effet sur l'apprentissage : les performances des sujets sont peu différentes suivant que l'avatar ait l'apparence d'un personnage de fiction exhibant peu de comportement de « communication sociale », ou qu'il s'agisse d'un visage humain réel (vidéo) exhibant de surcroît un comportement social de communication fort (fixation du regard durant l'explication). Il existe par ailleurs une longue tradition de résultats dans le domaine des simulateurs physiques pleine-échelle montrant que la fidélité de l'apparence physique n'est pas corrélée avec la performance en termes de transfert et d'apprentissage (voir Patrick, 1992, pp 497-502). La « fidélité psychologique » n'a pas de lien direct et simple avec les autres niveaux de fidélité. D'une part, les caractéristiques intrinsèques de fidélité d'un EV ne sont pas seules responsables du niveau de fidélité psychologique puisque viennent s'ajouter l'effet des caractéristiques de l'utilisateur, ainsi que la tâche choisie. D'autre part, les études en psychologie et en ergonomie montrent qu'un aspect important de l'efficacité de la simulation pour l'apprentissage et le transfert réside dans l'identification et la transposition des indices de la tâche qui permettront effectivement aux opérateurs de développer une activité similaire à celle développée en situation réelle.

L'hypothèse selon laquelle la présence facilite la performance ou l'apprentissage reçoit un soutien mitigé du fait du caractère contradictoire des résultats dans la littérature, voire de l'absence de résultats. La majorité des travaux utilise le questionnaire pour évaluer cette dimension psychologique de la cognition en EV, sans mise en relation avec d'autres

indicateurs de performance ou de comportement. Deux remarques font relativiser ce constat. La première est la diversité des usages et le flou avec lesquels le terme de présence a longtemps été utilisé. La seconde est que l'analyse de cette dimension nécessite de s'appuyer sur une méthodologie solide en même temps qu'elle doit faire référence aux théories du comportement et de la cognition humaine, ce qui n'a pas toujours été le cas.

IV Conclusion

Les propriétés les plus pertinentes d'un EV dépendent de l'objectif et de la façon dont il est (ou va) être concrètement utilisé (recherche, évaluation de compétences, formation, conception, réhabilitation). La notion de réalisme, par exemple, apparaît de façon récurrente comme une propriété explicitement nécessaire. Le réalisme s'apparente ainsi souvent à une propriété générique sans qu'il soit fait référence à une quelconque justification par rapport à la finalité du dispositif. En outre, on a vu qu'il s'agissait d'une notion mal définie. Cette tendance à considérer les propriétés des EV indépendamment (au moins relativement) de leur usage semble aussi vérifiée pour ce qui est des deux autres notions discutées dans ce papier : l'immersion, et la présence. Or, les activités perceptives et mentales des sujets ne sont pas passives : elles devraient être analysées dans le cadre d'une tâche/d'un objectif d'action à réaliser ou à apprendre.

En ergonomie, des adaptations et des recherches sont nécessaires pour contribuer à des méthodes et des principes prenant en compte les spécificités du domaine (Burkhardt, 2003). Nous suggérons de remplacer la notion de réalisme par les niveaux de fidélité pertinents pour ce qui est de l'évaluation de la qualité des EV, pour ce qui est de l'analyse des problèmes à traiter au cours de leur conception, et enfin pour ce qui est du questionnement scientifique concernant la perception et la cognition dans l'univers des manipulations rendues possibles en EV. En termes de recherche, le développement à la fois théorique et pratique d'une métrologie des EV est un premier axe. Le second axe de recherche porte sur la cognition et la perception dans les EV. Un troisième axe de recherche porte sur l'efficacité et les modes de représentation des entités et des utilisateurs dans l'EV, en quelque sorte le développement d'une « Psychologie des avatars ».

V Références

- Adams, N., & Lang, L. (1995). VR improves Motorola Training Program. *AI Expert*, may 1995, 13-14.
- Burkhardt, J.-M. (2003). Réalité virtuelle et ergonomie : quelques apports réciproques. *Le Travail Humain*, 66, 65-91.
- Burkhardt, J.-M., Lourdeaux, D., & Fuchs, P. (1999). *Conception d'un système de RV pour la formation des agents de conduites aux opérations en milieu ferroviaire*. In A. Grumbach & N. Richard (Eds.), *Journées Réalité Virtuelle et Cognition* (pp. 123-132). Paris : ENST.
- Byrne, C. M. (1996) *Water on Tap: the use of virtual reality as an educational Tool*. PhD. Dissertation, Department of Industrial Engineering, University of Washington, Seattle.
- Carr, K. (1995). *Introduction*. In K. Carr & R. England (Eds.), *Simulated and virtual realities: Elements of perception* (pp. 1-9). London: Taylor & Francis.
- Christou, C., & Parker, A. (1995). *Visual realism and virtual reality: a psychological perspective*. In K. Carr & R. England (Eds.), *Simulated and virtual realities: elements of perception* (pp. 53-84). London: Taylor & Francis.

Référence : Burkhardt, J.-M., Bardy, B. & Lourdeaux, D. (2003). Immersion, réalisme et présence dans la conception et l'évaluation des environnements virtuels. *Psychologie Française*, 48, 35-42.

- Draper, J. V., Kaber, D. B., & Usher, J. M. (1998). Telepresence. *Human Factors*, 40, 354-375.
- Frejus, M. (1998). *Evaluation of a virtual environment-based training tool through trainer-trainees interaction analysis*. Paper presented at ECCE-9, (pp. 115-120). University of Limerick, Ireland, August 24-26.
- Fuchs, P., & Moreau G. (2003). *Le traité de la Réalité Virtuelle*(2nd édition). Paris : Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris.
- Gay, E. (1994). Is virtual reality a good teaching tool? *Virtual Reality Special Report, Winter*, 51-59.
- Grau, J.-Y., Doireau, P., & Poisson, R. (1998). Conception et usage de la simulation. *Le Travail Humain*, 61, 361-385.
- Johnson, A., Moher, T., Ohlsson, S., & Leigh, J. (2001). *Exploring multiple representations in elementary school science education*. In H. Takemura & K. Kiyokawa (Eds.), *IEEE Virtual Reality Conference*, (pp. 201-208). Los Alamitos, CA : IEEE Press.
- Lapointe, J.-F., & Robert, J.-M. (2000). Using VR for efficient training of forestry machine operators. *Education and Information Technologies*, 5, 237-250.
- Leplat, J. (1997). Simulation et simulateur : principes et usages. In J. Leplat (Ed.) *Regards sur l'activité en situation de travail : contribution à la psychologie ergonomique* (pp. 157-181). Paris: PUF.
- Lombard, M., & Ditton, T. (1997). At the heart of it all : the concept of telepresence. *JCMC*, 3. Téléchargeable à l'adresse <http://jcmc.huji.ac.il>
- Moreno, R., Mayer, R. E., Spires, H. A., & Lester, J. C. (2001). The case for social agency in computer-based teaching: do students learn more deeply when they interact with animated pedagogical agents? *Cognition and Instruction*, 19, 177-213.
- Morineau, T. (2000) Context effect on problem solving during a first immersion in a virtual environment. *Cahiers de Psychologie Cognitive*, 19, 533-555.
- Patrick, J. (1992). *Training : research and Practice*. London: Academic Press.
- Péruch, P. and Gaunet, F. (1998). Virtual environments as a promising tool for investigating human spatial cognition. *Cahiers de Psychologie Cognitive*, 17, 881-899.
- Riva, G. (1998). *Virtual Reality in Neuro-Psycho-Physiology*. Amsterdam: IOS press.
- Stanney, K. M. (1998). Aftereffects and sense of presence in virtual environments : formulation of a research and development agenda. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 10, 135-187.
- Stoffregen, T. A., & Bardy, B. G. (2001). On specification and the senses. *Behavioral and Brain Sciences*, 24, 195-261.
- Stoffregen, T. A., Bardy, B. G., Smart, L. J., & Pagulayan, R. J. (2003, sous presse). *On the nature and evaluation of fidelity in virtual environments*. In L. J. Hettinger & M. W. Hass (Eds.), *Psychological issues in the design and use of virtual environments* Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Syseca (1998). *Industrial application of VR* (report 1786-DOC-97-D-2700-C0017165). Paris : Syseca.



Université René Descartes – Paris 5

Laboratoire d'Ergonomie Informatique

45, rue des Saints-Pères, 75270 Paris Cedex 06

Tél 33 (0) 1 42 86 21 35 - Fax 33 (0)1 42 96 18 58

E-mail : {jean-marie.burkhardt, marion.wolff}@ergo-info.univ-paris5.fr

Web : <http://www.univ-paris5.fr/LEI>

Réalité virtuelle et nouvelles
technologies en formation : vers une
formalisation des critères de choix et de
la démarche centrée sur l'apprentissage

J-M. Burkhardt & M. Wolff*

12 décembre 2005

Projet SNCF/LEI " Réalité virtuelle et nouvelles technologies en formation : vers une formalisation des critères de choix et de la démarche centrée sur l'apprentissage".

* Une partie des entretiens réalisés dans le cadre de cette recherche et les retranscriptions ont bénéficiées de la participation de K. Collet, I. Tran, C. Meignant et C. Delgoulet.

Sommaire

I	INTRODUCTION	1
I.1	OBJECTIFS DE L'ÉTUDE	1
I.2	ORGANISATION DU DOCUMENT.....	1
I.3	REMERCIEMENTS.....	2
II	DES NOUVELLES TECHNOLOGIES ASSOCIÉES À LA FORMATION (NTF)	3
II.1	PLACE DE L'ERGONOMIE DANS LE DOMAINE DE LA FORMATION PROFESSIONNELLE ET DES TECHNOLOGIES D'APPRENTISSAGE.....	3
II.1.1	<i>Analyser le travail pour concevoir ou aménager la formation</i>	4
II.1.2	<i>L'ergonomie des outils et supports pour la formation</i>	5
II.1.3	<i>L'analyse du travail en tant qu'outil de l'apprenant et du formateur</i>	6
II.2	PANORAMA DU DOMAINE	6
II.2.1	<i>Des projets très différents</i>	6
II.2.2	<i>Plusieurs attaches paradigmatiques et technologiques</i>	7
	L'enseignement assisté par ordinateur	7
	L'éducation à distance	8
	Les approches constructivistes de l'apprentissage.....	8
	Télétravail et télé-opération	9
II.2.3	<i>Quelques données actuelles sur le multimédia interactif d'apprentissage</i>	10
	Efficacité : apprentissage ou motivation?	10
	L'animation : un usage à cibler	10
	Intérêt d'un agent pédagogique dans l'interface	11
	Influence des caractéristiques de l'interface.....	11
	Des domaines d'application privilégiés?	12
II.3	ÉLÉMENTS POUR L'ANALYSE ERGONOMIQUE DES SITUATIONS ET OUTILS ACTUELS	12
II.3.1	<i>Le formateur et l'apprenant</i>	13
II.3.2	<i>Des configurations variées de situations</i>	13
II.3.3	<i>Tâches et activités</i>	15
II.3.4	<i>Validation-évaluation de l'apport d'une technologie à l'apprentissage et la formation</i>	16
III	ÉTAT DE L'ART DE L'UTILISATION DE LA RÉALITÉ VIRTUELLE POUR LA FORMATION	17
III.1	LA RÉALITÉ VIRTUELLE.....	17
III.1.1	<i>Architecture et interfaces des Environnements Virtuels (EV)</i>	18
III.1.2	<i>Applications actuelles</i>	19
III.1.3	<i>Trois dimensions caractéristiques des environnements virtuels : tentative de définition</i> ...	19
	Immersion.....	19
	Présence	19
	Réalisme	20
III.2	USAGE DE LA RV EN FORMATION.....	21
III.2.1	<i>Types d'usage et intérêt de la réalité virtuelle pour la formation</i>	21
	Outil à destination du formateur	21
	Outil à usage didactique pour l'apprenant.....	21
	Intérêts pour la formation.....	22
III.2.2	<i>Quelques dimensions et aspects de la conception d'EV de formation</i>	24
	Apprentissage et rôle de l'apprenant en EV	24
	Statut de l'erreur.....	25
	Couplage avec d'autres outils pour la formation.....	25
	Dimensions supplémentaires pour la conception d'un EV orienté-formation	25
III.2.3	<i>Une revue des données empiriques</i>	26
	Réalisme, photo-réalisme.....	27
	Motivation liée à l'usage de la RV.....	28
	Pédagogie active, interactivité et EV.....	29
	Sémantique "naturelle", dimension intuitive.....	29
	Présence, performance et apprentissage.....	30

Coopération au sein de l'EV	31
Immersion, multi-sensorialité.....	31
III.3 ERGONOMIE ET CONCEPTION D'EV POUR LA FORMATION.....	33
III.3.1 Interventions de l'ergonomie.....	35
III.3.2 Dimensions importantes de la conception.....	37
Modèles de l'utilisateur.....	37
La détection d'intention : considérer la piste des modèles de tâches.....	38
Opérativité et analyse des représentations mentales.....	38
III.3.3 Les interfaces.....	39
Paradigme d'asservissement vue-périphériques de mouvement dans les EV.....	39
Visualisation d'information (en 3D).....	40
Entrées 3D.....	42
Mécanismes de repositionnement/recalibration.....	43
IV ETUDE DES REPRÉSENTATIONS DE LA RÉALITÉ VIRTUELLE ET DE L'USAGE DES SIMULATEURS DANS LA FORMATION	45
IV.1 RECUEIL D'ENTRETIENS.....	45
IV.1.1 Les sites visités.....	45
IV.1.2 Modalités de passation.....	45
IV.2 ANALYSE DISCURSIVE DES ENTRETIENS	46
IV.2.1 Examen de l'homogénéité des discours : style et mise en scène.....	46
IV.2.2 Création du scénario d'analyse des verbalisations.....	49
IV.3 ANALYSE GÉOMÉTRIQUE DES DONNÉES	51
IV.3.1 De l'analyse du discours au tableau de données.....	51
IV.3.2 Principes de l'approche géométrique de l'analyse de données multivariées.....	53
Protocole de base.....	53
L'espace des individus.....	53
L'espace des variables.....	53
IV.3.3 Statistiques élémentaires.....	54
Moyennes et variances.....	54
Corrélations	55
IV.3.4 Analyse en Composantes Principales des discours.....	56
Nuage des variables.....	57
Nuages des points moyens.....	61
IV.4 CLASSIFICATION ASCENDANTE HIÉRARCHIQUE (CAH).....	69
IV.4.1 Principes de la CAH.....	69
IV.4.2 Résultats de la CAH sur les données.....	69
IV.5 RETOUR À L'ANALYSE DU DISCOURS ET PARTICULARITÉS DES PARTITIONS	71
V CONCLUSION-SYNTHESE : VERS DES OUTILS D'AIDE À LA CONCEPTION.....	72
V.1 DISCUSSION ET ÉLÉMENTS DE RÉPONSES AUX QUESTIONS INITIALES.....	72
V.1.1 Y a-t-il une ou plusieurs technologies plus parfaitement adaptées pour répondre à tel besoin particulier de formation ?	72
V.1.2 Y a-t-il des contenus pour lesquels une technologie en particulier ne peut pas être utilisée ?	74
V.1.3 Le peu d'efficacité d'un outil relève-t-il d'un mauvais choix de technologie, d'un problème de méthode, ou d'une mauvaise interface ?.....	74
V.1.4 Comment peut-on évaluer ou améliorer un outil de formation existant, avec quels moyens, et pour quel résultat ? etc.....	75
V.2 OUTILS MÉTHODOLOGIQUES POUR ASSISTER LA CONCEPTION	75
V.2.1 Préciser la situation et l'outil	75
La situation de formation projetée avec les Nouvelles Technologies de Formation.....	75
L'outil.....	76
V.2.2 L'accompagnement du projet.....	77
V.2.3 L'évaluation.....	78
V.3 PERSPECTIVES	79
VI RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES DES PARTIES II & III.....	80
VII RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES DE LA PARTIE IV	87

VIII	ANNEXE TECHNIQUE.....	88
VIII.1	PRÉSENTATION DU LEI DE L'UNIVERSITÉ PARIS 5	88
VIII.2	RAPPEL DE LA MÉTHODOLOGIE DU PROJET.....	88
VIII.3	PLANNING DE L'ÉTUDE	89
VIII.4	RESPONSABLES SCIENTIFIQUES :	89

I Introduction

Le développement des « nouvelles technologies » engendre une diversité croissante d'outils utilisables pour la formation. Il devient de plus en plus nécessaire de se pourvoir en outils d'analyse permettant d'apprécier cette diversité, d'une part afin de comparer l'existant et les alternatives proposées actuellement sur le marché, d'autre part afin d'engager la réflexion sur les outils les plus appropriés aux besoins actuels et futurs identifiés. De plus en plus, en effet, les acteurs de la formation sont amenés à s'interroger :

- Y a-t-il une ou plusieurs technologies plus parfaitement adaptées pour répondre à tel besoin particulier de formation ?
- Y a-t-il des contenus pour lesquels une technologie en particulier ne peut pas être utilisée ?
- Le peu d'efficacité d'un outil relève-t-il d'un mauvais choix de technologie, d'un problème de méthode, ou d'une mauvaise interface ?
- Comment peut-on évaluer ou améliorer un outil de formation existant, avec quels moyens, et pour quel résultat ? etc.

La démarche traditionnelle en ergonomie consiste à privilégier une approche globale, « systémique » pour tenter d'aborder ces questions, dans la mesure où la focalisation sur le seul outil n'est pas suffisante pour comprendre et formaliser le processus d'apprentissage et de gestion de la situation de formation. L'approche ergonomique s'appuie sur deux axes pratiques principaux d'analyse (l'utilité des fonctions offertes à l'utilisateur ; l'utilisabilité et l'accessibilité des systèmes par rapport aux utilisateurs et à leur tâche), sur un axe méthodologique qui est la démarche expérimentale, et sur un axe théorique qui concerne l'homme au travail dans ses différentes dimensions (physiologique, anthropologique, perceptive, cognitive, sociale, organisationnelle etc.).

1.1 Objectifs de l'étude

La présente recherche vise à formaliser les fonctions, intérêts et limitations réels de la technologie de Réalité Virtuelle pour la formation, notamment relativement à d'autres technologies connexes (simulateurs, EAO) à partir, d'une part, des données de la littérature scientifique, d'autre part, de cas récents d'applications analysés selon le point de vue de différents acteurs du domaine : décideurs, formateurs, concepteurs d'outils de formation, utilisateurs en formation. Cette recherche s'intéresse essentiellement à identifier et formaliser des aspects « objectifs » de la technologie et des situations utilisées pour la formation ; des facteurs plus macros (stratégie, marketing, politique, accompagnement, mode de promotion sur le terrain) ne sont pas considérés de façon privilégiée.

1.2 Organisation du document

La première partie présente plus largement la problématique des "nouvelles technologies" associées à la formation. Malgré le recours médiatique au qualificatif "nouveau" systématiquement accolé aux développements actuels des technologies pour la formation, nous nous garderons de suivre ceux qui en tirent argument pour rejeter les connaissances accumulées dans les domaines d'origine ou les domaines traitant de cas similaires. L'analyse de l'apport des différentes technologies qui participent aux Technologies de l'Information et de la Communication dans l'Enseignement (TICE : Enseignement Assisté par Ordinateur, simulateur,...) permet d'examiner à la fois les apports spécifiques et non spécifiques de la technologie, et aussi d'analyser leurs

conséquences dans les situations de formations et pour ses différents acteurs.

La seconde partie de ce rapport présente une synthèse de la littérature scientifique sur le domaine de la réalité virtuelle utilisée pour la formation.

La troisième partie présente la méthodologie et les résultats actuels de la campagne d'entretiens visant à analyser la représentation d'acteurs du domaine. 25 entretiens semi-dirigés ont été menés à ce jour (grilles d'entretien en Annexe) correspondant à approximativement à 26 h d'enregistrements ; 24 entretiens ont été intégralement retranscrits (soit environ 200 h de retranscription).

La dernière partie du document s'attache à dériver des deux précédentes des outils et proposer des pistes de réflexion pour la conception des nouveaux outils de formation, en particulier lorsqu'il s'agit de la simulation et de la réalité virtuelle.

1.3 Remerciements

Tous nos remerciements vont aux personnes qui ont bien voulu participer à cette étude, que cela soit au travers des entretiens menés dans divers structures (SNCF, EUROCONTROL, INRIA, AFPA, Ecole des Mines de Paris, CENA¹ ...), mais également au travers des multiples discussions enrichissantes que les auteurs ont pu avoir avec elles.

¹ Pour des raisons de date, les données recueillies au Centre National d'Etudes de la Navigation Aérienne ne sont pas intégrées dans le présent rapport.

II Des nouvelles technologies associées à la formation (NTF)

La mondialisation de la communication et de l'accès à l'information, l'extension de la numérisation à d'autres secteurs que l'informatique, comme les télécommunications et l'audio-visuel, est à l'origine d'un mouvement de *convergence* des nouvelles technologies (Maherzi, 1997)². Cette convergence de "technologies avancées" telles que la simulation, le multimédia, et les réseaux est souvent considérée comme un facteur potentiel d'innovation dans le cadre de la formation. Elle amène idéalement un progrès substantiel par rapport à des supports plus classiques (livres, photocopiés, audiovisuel). La capacité de représentation des nouveaux outils est puissante et diversifiée, qu'il s'agisse de fournir une représentation dynamique ou de réifier un champ de connaissances (e.g. simulateurs, réalité virtuelle, jeux...). Ces nouveaux outils autorisent également une aide contextuelle à l'action et à l'apprentissage, qui s'associe à l'interactivité des systèmes afin de rendre l'apprenant plus autonome et actif dans sa formation. Le réseau diminuerait la contrainte temporelle et géographique pour ce qui est d'accéder à des lieux de formation ou à des experts du domaine. Enfin, les outils de coopération et de travail en groupe tentent de conférer une certaine dimension sociale et coopérative aux activités liées à la formation à distance. Par rapport à la formation traditionnelle, il y a un changement notable de perspectives quant aux objets, au temps et aux lieux : la formation devient en partie dématérialisée, désynchronisée et délocalisée (Burkhardt, Michel, Ronca, & Sperandio, 1998). Les aspects économiques, sociaux et culturels contribuent enfin à dessiner le contexte de ce développement.

II.1 Place de l'ergonomie dans le domaine de la formation professionnelle et des technologies d'apprentissage

D'une manière générale, l'ergonomie appliquée aux nouvelles technologies mène des études ayant pour objectif d'analyser, pour l'améliorer, la confrontation interactive entre des humains et des technologies.

Du point de vue du composant humain, les études visent à comprendre et à formaliser l'activité des futurs utilisateurs, en insistant sur leurs caractéristiques ainsi que sur les caractéristiques des situations variées où prend place l'interaction avec le système (modélisation des utilisateurs). Du point de vue de la technologie, l'exploitation des connaissances spécifiques sur l'utilisateur et son activité en situation, ainsi que des connaissances génériques sur le fonctionnement de l'homme (perception, cognition, motricité) permet de produire des recommandations et de construire une procédure d'évaluation ergonomique des systèmes (ergonomie des logiciels). L'ergonomie intervient ainsi depuis les phases initiales de la conception jusqu'aux évaluations finales en situation réelle avec des utilisateurs (Sperandio, 1993).

Dans le domaine des technologies d'apprentissage et pour la formation, l'ergonomie intervient à travers les trois aspects principaux suivants, qu'il s'agisse d'interventions de recherche ou d'application [Burkhardt, 2002 #765 ; Burkhardt, 1998 #461]. Pour un point de vue élargi à la formation des formateurs, on pourra consulter aussi (Gaillard, 1997;

² Cet auteur distingue trois niveaux dans la convergence : 1) la *convergence technique*, qui correspond à l'adoption de la technologie numérique dans les trois domaines que sont l'informatique, l'audiovisuel et les télécommunications ; 2) la *convergence fonctionnelle* qui traduit l'interchangeabilité potentielle des supports et des services entre les trois domaines ; 3) la *convergence d'entreprises* des trois domaines de plus en plus regroupées au sein d'une même structure.

Teiger, Lacomblez, & Montreuil, 1997).

II.1.1 Analyser le travail pour concevoir ou aménager la formation

Ce premier aspect, historiquement le plus ancien, est le recours à l'analyse du travail pour concevoir les outils de formation (voir par exemple Leplat, 1955; Ombredane, 1955). Les données issues de l'analyse du travail constituent une base pour la conception et la modification de la formation des opérateurs (e.g. Aubert, 1999 ; Bisseret & Enard, 1969-1970; Chatigny & Vézina, 1995). Les méthodes de l'ergonomie ont ici pour but de faire expliciter les relations essentielles à la structure opérationnelle du travail, et dont l'assimilation est une des principales sources de difficultés pour le débutant (Bisseret & Enard, 1969-1970). L'analyse du travail s'applique également à l'analyse des situations de formation (e.g. Durey, 1960 ; Gillet, 1973; Vermersch, 1976).

Il existe en particulier une tradition de travaux en ergonomie sur la simulation, en particulier à visée de formation (voir Bisseret & Enard, 1969-1970; plus récemment Samurcay & de Keyser, 1998). Plusieurs dimensions de la situation simulée ont ainsi été décrites depuis longtemps relativement au travail à apprendre. Bisseret et Enard (1969-1970) distinguent par exemple les situations où l'on demande la réalisation d'opérations partielles sans que la succession corresponde à une succession réelle du travail (simulation **analytique**) et les situations où cet aspect séquentiel réel est respecté (simulation **chronologique**). Les simulations **statiques** représentent une situation de travail réelle figée à un instant, dans la mesure où l'ensemble de l'information nécessaire au traitement de la tâche est donnée en une fois ; à l'inverse, la simulation **dynamique** se caractérise par le rythme d'arrivée des données selon le même rythme que dans le travail réel. Enfin, la performance attendue chez l'apprenant peut ne pas être contrainte temporellement, en **rythme libre**, ou bien s'effectuer avec la **même contrainte temporelle de performance qu'en travail réel**, plus ou moins contraignante selon la charge de travail.

La dimension de la **fidélité** de la simulation est souvent évaluée en référence à son apparence visible par comparaison à l'environnement du travail, ou bien à sa capacité à reproduire des réactions et un comportement analogue aux systèmes impliqués dans le travail. Cependant, les études en psychologie et en ergonomie montrent qu'un aspect important de l'efficacité de la simulation pour l'apprentissage et le transfert réside dans l'identification et la transposition des indices de la tâche qui permettront effectivement aux opérateurs de développer une activité similaire à celle dans la situation de travail réel. Ce principe de la **fidélité psychologique** (Leplat, 1997) se démarque de la recherche du réalisme dans la mesure où la simplification des autres variables de l'environnement facilite dans un premier temps la sélection des indices pertinents et la construction de modes opératoires appropriés. Grau et al. (Grau, Doireau, & Poisson, 1998, p 372) notent néanmoins que "les analyses psychologiques des situations de travail à simuler sont faites *a minima* par des personnels le plus souvent peu qualifiés pour cette tâche". La tendance à rechercher des niveaux élevés de fidélité physique ou fonctionnelle masquerait ainsi l'absence d'une telle analyse psychologique ; les simulateurs ainsi conçus montrent pourtant très rapidement leur limites (Grau et al., 1998).

L'analyse ergonomique de l'activité d'apprentissage dans le domaine professionnel insiste finalement sur la complémentarité, tant pratique qu'en terme d'efficacité, des approches globales et des approches analytiques/fractionnées. L'intérêt des **méthodes globales** (simulation, apprentissage sur le tas,...) réside dans la minimisation du transfert de la situation d'apprentissage vers la situation réelle de travail, et dans le fait que les connaissances acquises ont toutes les chances d'être structurées de façon opérationnelle (Bisseret & Enard, 1969-1970). **La simulation** permet notamment de sauvegarder la proximité avec la situation de travail en éliminant certains inconvénients

de l'apprentissage sur le tas (processus non systématique, non méthodique, non contrôlable, qualité pédagogique aléatoire selon l'opérateur-tuteur), et en rendant possible une certaine programmation dans l'apprentissage: « il est possible de jouer en particulier sur l'ordre de présentation de situations de travail réelles en les hiérarchisant des plus simples aux plus complexes (voir par exemple Bisseret & Enard, 1969-1970, p 98).

Les **méthodes analytiques** "supposent que le travail, objet de l'apprentissage, soit analysé en unités élémentaires, chacune de celles-ci étant apprise de façon indépendante puis jointe aux autres unités» (Bisseret & Enard, 1969-1970). L'intérêt de ces méthodes réside dans la réduction de la complexité pour l'apprenant, et concomitamment dans une meilleure adaptation aux formats des dispositifs informatiques de formation de moindre coût (Eberts, 1997, p 837). Toutefois, un premier problème est la définition précise et complète des unités à apprendre (Bisseret & Enard, 1969-1970, p 98) : les informations elles même, ainsi que l'aspect de la structuration de l'ensemble de ces informations, de façon à respecter la structure du contenu à enseigner, c'est à dire du travail global. Un second problème est de proposer une méthode d'apprentissage facilitant la combinaison des unités ; cette méthode passe généralement par la hiérarchisation des unités en recherchant une organisation optimale pour apprendre les unités (Bisseret & Enard, 1969-1970, p 98). Pour ces deux auteurs, une voie consiste à organiser l'apprentissage des unités à partir de deux familles de relations. La première est la logique de construction des informations/données de la tâche ; elle correspond à l'ensemble des règles (ou des propriétés) qui permettent de décrire cet ensemble de données indépendamment du système de travail considéré. La seconde est la (les) logique(s) d'utilisation ; cette logique correspond à l'interprétation, et à la façon dont sont effectivement utilisées les informations/données par un opérateur expérimenté, selon le problème à résoudre dans la situation globale de travail.

II.1.2 L'ergonomie des outils et supports pour la formation

Il existe à présent abondance de littérature sur l'ergonomie des logiciels (e.g. Sperandio, 1993). On peut difficilement en dire autant pour ce qui concerne le domaine des logiciels pour la formation (mais voir Burkhardt et al., 1998; Eberts, 1997; Hu, Trigano, & Crozat, 1998). Les critères défendus concernent traditionnellement l'utilisabilité, la compatibilité, l'accessibilité et la dangerosité, en s'appuyant sur la mise en œuvre d'une démarche centrée sur l'utilisateur et son activité (Burkhardt & Sperandio, à paraître).

L'ergonomie et la psychologie étudient d'une part les caractéristiques de supports efficaces à la transmission de l'information et à l'apprentissage : visuels, documentation utilisateur, etc. (e.g. Dubois, 1999; Ganier, Gombert, & Fayol, 2000). Pour une synthèse et une discussion de l'apport de la sémiologie à cette question de l'ergonomie des supports à l'information, voir par exemple Cuny & Hoc (1974).

L'ergonomie produit d'autre part des spécifications et des recommandations visant à rendre les outils informatiques compatibles de façon optimale avec les modes de raisonnements et les caractéristiques des utilisateurs, en particulier dans le contexte de l'informatisation des outils pour la formation et l'auto-formation (Bétrancourt & Tversky, 2000; Tricot, 1995 ; Vezin, 1974).

L'ergonomie apporte enfin des méthodes d'évaluation des logiciels et des situations en regard de l'activité de l'utilisateur, de l'adéquation des objectifs de formation par rapport à la situation de travail réelle, et enfin la détection des problèmes éventuels d'interface (Specht & Burkhardt, 2000).

II.1.3 L'analyse du travail en tant qu'outil de l'apprenant et du formateur

Ce dernier aspect relève de l'instrumentation, à des fins pédagogiques, des méthodes et techniques développées en ergonomie pour analyser le travail. Celles-ci sont en effet particulièrement aptes à rendre compte des caractéristiques fines de l'activité (description, genèse des compétences associées à la tâche) et fournissent des outils éprouvés empiriquement pour partager et formaliser l'expérience professionnelle (collectif, capitalisation de l'expérience, formation en tant que processus continu) ; en outre, leur usage en auto-analyse de l'activité favorise le mécanisme de prise de conscience des connaissances sur l'action (e.g. Six-Touchard, 1998).

II.2 Panorama du domaine

C'est probablement la diversité des réalisations et des concepts qui caractérise en premier lieu le domaine actuel des nouvelles technologies de formation. Il en résulte un certain flou dans les définitions, les hypothèses ou les affirmations qui sont faites, rendant difficiles la mesure de la nature exacte des bénéfices ou des coûts résultants.

La diversité la plus visible est celle relative à la variété des supports, des technologies et des artefacts produits: simulateurs de conduite, CD-roms d'autoformation, Environnements Interactif d'Apprentissage Humain (EIAH), cours radio-diffusés sur le réseau Internet, etc. Cette diversité tient en même temps au positionnement variés des acteurs qui rendent compte de leur expérience : formateurs, apprenants, staff, concepteurs, ergonomes, etc.

D'autres facteurs concourent à cette diversité : les caractéristiques du projet de conception d'une part, les repères théoriques et techniques qui fondent et motivent ces développements.

II.2.1 Des projets très différents

La diversité provient en effet, pour une part, de la forte disparité de granularité et d'ampleur des projets rassemblés sous l'étiquette de « nouvelles technologies de formation ».

Complexes, tant en termes d'enjeux que de mise en œuvre, les projets d'envergure organisationnelle nécessitent la collaboration d'équipes pluridisciplinaires (informaticiens, pédagogues, utilisateurs, ergonomes, organisateurs, gestionnaires, experts du domaine, graphistes ...). Leur réussite semble liée à l'existence d'une approche projet impliquant l'ensemble des acteurs de la formation (e.g. Télé Université de Montreal, voir Paquette, 1995) et mobilisant simultanément les ressources matérielle, humaine et financière de l'organisation pour en mener à bien la réalisation. Le niveau réel de mobilisation et de soutien de la part de l'organisation explique très directement l'échec ou le succès dans le développement et la généralisation du multimédia en formation (Neuman, Marchionini, & Morrel, 1995). L'approche projet est d'autant plus importante que le champ est en pleine évolution.

A une autre échelle, un foisonnement d'outils variés traitent d'aspects de l'interaction de l'apprenant avec un système, et plus rarement du formateur avec un système. Par exemple, KennisGraaf (Zwaneveld & Vuist, 1995) décrit le contenu de la base de matériels de cours en mathématique, à l'aide d'un réseau sémantique que l'étudiant parcourt et à l'intérieur duquel il définit son objectif de formation. Des systèmes basés sur les technologies de modélisation 3D et de réalité virtuelle apparaissent également depuis quelques années dans le domaine de la formation technique, de la formation à la maintenance (Frejus, 1997), et dans le domaine médical (Stytz, Banks, Garcia, & Godsell-Stytz, 1997). Dans ce type de projets, souvent mené en laboratoire, les enjeux relèvent essentiellement de la technique ou de la preuve de concepts.

Les outils développés dans le monde professionnel et industriel font actuellement peu de publicité sur leur résultat et leur utilisation ; une piste d'étude est ici à entreprendre.

II.2.2 Plusieurs attaches paradigmatiques et technologiques

La diversité tient parallèlement aussi à la coexistence d'emprunts technologiques et théoriques différents (Burkhardt et al., 1998; Schneiderman, Borkowski, Alavi, & Norman, 1998).

L'enseignement assisté par ordinateur

L'enseignement assisté par ordinateur (EAO), inspiré fortement à ses débuts par la psychologie behavioriste et son application à travers *l'enseignement programmé*, vise à concevoir des programmes informatiques permettant la réification d'un contenu et d'une approche pédagogique à suivre par des apprenants, ou permettant d'évaluer leurs performances et/ou leurs progressions. Les travaux actuels concernent notamment la conception de *didacticiels*, systèmes d'auto-formation et/ou d'instruction individualisée, et de *tuteurs intelligents*. Avec l'apport de techniques issues de l'intelligence artificielle, et du multimédia interactif, l'objectif est ainsi de proposer de véritables *Environnement Interactif d'Apprentissage Humain (EIAH)*. Parmi les idées fortes du domaine³, on notera :

- la **systematisation et la programmation** du discours pédagogique et de l'assistance ;
- l'**individualisation** de la formation sur trois plans : le **rythme** d'apprentissage, l'adaptation des **objectifs** au niveau de l'élève ; la modification de la **stratégie pédagogique** selon les caractéristiques de l'apprenant⁴;
- l'exploitation de **supports de présentation de l'information et d'interaction** potentiellement efficaces : **support dynamique** à la présentation d'information (animation, vidéo,...), par opposition à des supports statiques tels que le papier ou les transparents; **contrôle de l'interaction** à des degrés variés, confié en partie à l'utilisateur ; **délinéarisation et détextualisation** par le mécanisme des liens hypertextuels qui autorisent plusieurs cheminements à travers une présentation du contenu sous une forme multimédia, et non uniquement textuelle ; **réification** enfin, qui consiste à présenter, sous une forme concrète et intelligible, un objet conceptuel, abstrait ou hors du champ de la perception humaine.

Du point de la vue de la conception, un désavantage important de ces systèmes est le fort coût en temps et en expertise pour développer de systèmes réellement efficaces. Eberts (1997, p 829) souligne que suivant l'ampleur et le type d'EAO produit (module vs cursus complet ; simulation vs présentation...), la littérature mentionne des coûts allant de 3 à 6 heures/ heure produite, pour un auteur expérimenté, lorsqu'il s'agit des plus simples réalisations (présentation de contenu), jusqu'à plus de 2000 heures/heure produite pour des cursus complets.

³ Voir par exemple Bruillard (1997) pour une présentation du domaine et de ses évolutions historiques.

⁴ Plusieurs caractéristiques individuelles ont été étudiées en lien avec la conception des technologies d'apprentissage : Pensée globale /analytique, Dépendance /indépendance à l'égard du champ, stratégies d'apprentissage, etc. L'absence actuelle de résultat dans cette ligne de recherche suggère deux pistes d'explications : d'une part, les caractéristiques individuelles sélectionnées ne sont peut être pas les plus pertinentes et, d'autre part, même si elles s'avéraient pertinentes, la conception ne sait pas réellement en tirer les implications efficaces pour l'individualisation des outils informatiques pour l'apprentissage.

Il y a également trop peu d'études utilisant des indicateurs fiables et une méthodologie adaptée à l'évaluation de leur efficacité (Bétrancourt & Tversky, 2000).

L'éducation à distance

L'éducation à distance (E.A.D) et le *télé-enseignement* concernent les moyens de passer outre la distance physique et la nécessité d'une présence simultanée des acteurs (formateurs et formés), afin de permettre à des apprenants et formateurs/enseignants d'interagir de façon synchrone ou asynchrone. Le développement des technologies réseaux (Internet, Intranet et autres réseaux locaux) offre potentiellement la possibilité de s'affranchir, en grande partie, des contraintes de simultanéité de temps et d'espace propres à la situation présente traditionnelle, tout en sauvegardant un minimum d'interactivité à la formation. Un avantage supplémentaire du web serait de faciliter l'interaction directe entre l'étudiant et ses enseignants. Trois fonctions clef peuvent être distinguées :

- la **fourniture et le partage interactif de ressources** à distance : documents de travail, ressources pédagogiques variées, outils ...
- le **tutorat** synchrone (chat, liaisons audio, vidéo...) et asynchrone (messagerie);
- la **coopération entre pairs** (stagiaires en formation, mais également formateurs), selon des formes variées : video-conférences, forum, documents partagés...

D'une façon générale, il y a un manque de recherches empiriques pour évaluer et améliorer l'efficacité de ce mode de formation (Boling & Robinson, 1999). La problématique de l'E.A.D est encore traitée essentiellement sous ses aspects techniques (e.g. messagerie électronique, vidéo-conférences, tableau blanc, forums), et les solutions actuelles posent des problèmes qui en limitent l'utilisation dans le cadre de la formation. Outre des défauts d'utilisabilité, ces problèmes sont notamment (a) un niveau d'interaction enseigné-enseignant quantitativement et qualitativement limité par comparaison avec l'interaction en face à face ; (b) un niveau d'interaction entre paires quantitativement et qualitativement limité également ; (c) l'exigence d'une plus grande capacité d'autonomie et d'auto-organisation; (d) l'exigence d'une forte capacité d'auto diagnostic pour palier la ponctualité des interactions. S'inspirant des premières expériences en matière de tutorat et de cours par Internet à l'Open University, Petre (1996) déconseille ainsi le recours à des systèmes utilisant des liaisons synchrones ou quasi asynchrones, contraignants pour un enseignement à très grande échelle, et peu satisfaisants pour les apprenants. L'expérience du projet européen CO-LEARN amène Dericke (Derycke & D'halluin, 1995) à conclure dans le même sens : « try to reduce the fascination for real-time interaction (p 133) ». Le bilan d'une expérimentation grandeur réelle de cours distants par la visioconférence (voir Bazin & Brisson, 1998) souligne là encore les limites de ces outils, limites qui ne peuvent être réduites à la seule dimension de la technique.

Les approches constructivistes de l'apprentissage

L'approche de *l'apprentissage par l'action et par l'exploration* vise le développement d'outils/projets qui permettent à l'apprenant de construire activement des connaissances. La résolution de problèmes en soit permet d'engendrer de nouvelles connaissances ; cette idée n'est pas nouvelle, mais le principe est d'une certaine façon que les termes du problème puissent être construits également par l'apprenant, de façon explicite, et non la seule solution à un problème bien posé, comme dans l'approche plus traditionnelle.

L'apprentissage coopératif/collaboratif . Cette approche, affiliée historiquement à des travaux de pédagogues ou de psychologues comme Freinet en France, Vygotsky en

Russie ou Dewey aux USA, met l'accent sur l'importance du travail en groupe et la dimension sociale dans le processus de (co-) construction des connaissances. Une interprétation « cognitive » de ces approches aboutirait à souligner l'effet bénéfique de la situation de coopération en groupe sous plusieurs angles : (a) la nécessité d'avoir à négocier la représentation de la situation (voir e.g. Roth, 2001), (b) l'engagement dans le groupe et la motivation à atteindre un objectif collectif, et (c) la nécessité de verbaliser à haute voix le raisonnement (pour une illustration de cet effet, voir par exemple Davies & Castell, 1992), d'expliquer le raisonnement (e.g. Chi, Bassok, Lewis, Reimann, & Glaser, 1989).

Les courants de *l'apprentissage par l'action* et de *l'apprentissage collaboratif* renvoient directement à la notion de *méthode active* en pédagogie. Une méthode est dite active lorsque le stagiaire progresse de par son activité propre : il découvre par lui même (Goguelin, 1987). Cet auteur insiste sur le fait qu'une méthode n'est jamais active parce que l'apprenant fait, réalise une action ou interagit : par exemple, des exercices de manipulation en chimie dont l'ordonnancement est donné à l'élève ressortent des méthodes affirmatives⁵. Pour Goguelin (1987), le rôle du formateur est de faire prendre conscience du cheminement de sa pensée au stagiaire, et pour cela de la reformuler synthétiquement devant lui. De façon générale, on opère en groupe auquel un problème –généralement concret et emprunté au quotidien – est posé. A chaque pas de solution proposé par le groupe, le formateur reformule clairement ce qui vient d'être fait. Le groupe doit tenter alors de justifier et d'expliquer ce dont il vient de prendre conscience. Si la justification est fautive, le formateur propose une situation concrète, cohérente avec les justifications données, pour que le groupe découvre son erreur. Si la justification est bonne, le formateur l'accepte et la résume, rendant ainsi l'auto-progression du groupe claire pour l'ensemble des membres du groupes. A la fin, chaque groupe doit rendre compte de son résultat et le formateur opère une synthèse –ou fait opérer cette synthèse par l'un des apprenants.

Il est facile, dans le domaine des nouvelles technologies de formation, de glisser de la notion de pédagogie active à la notion d'interactivité. Pourtant, le fait de demander de cliquer à l'apprenant ressort certes de l'interactivité, mais n'est pas un critère pour garantir la qualification d'active à une pédagogie. Ainsi, bien qu'arguant d'une approche active, de nombreux EAO, et plus récemment des systèmes hypertextes et hypermédias pour la formation, adoptent en pratique un modèle de l'enseignement relevant plutôt du domaine des *méthodes affirmatives*⁵, dans la mesure où ils délivrent un contenu "vrai" lequel correspond à ce que l'élève doit faire, doit penser et doit sentir etc.

Télétravail et télé-opération

Le télétravail et la *télé-opération* ; dans le domaine de la médecine par exemple, des recherches menées notamment dans le cadre de la communauté européenne concernent la télé-médecine (télé-diagnostic, télé-chirurgie, assistance thérapeutique...) par l'intermédiaire de systèmes de visioconférences ou de technologies de modélisations et de simulation du type réalité virtuelle. Bien que non spécifiquement orientées vers la formation, ces projets ont des applications réelles dans le domaine de la formation.

⁵ Ou encore appelées méthodes expositives ou dogmatiques (Goguelin, 1987) ; les deux modes de réalisations typiques sont l'exposé magistral pour ce qui est des savoirs et savoirs-faire intellectuels, où l'exposé et les explications vont être très largement utilisées, et la démonstration pour ce qui est des savoirs faire manuels, où le formateur présente, montre et démontre.

II.2.3 Quelques données actuelles sur le multimédia interactif d'apprentissage

Le domaine le plus investi concerne, à ce jour, les outils pour l'autoformation. En ce qui concerne l'efficacité et la conception des nouvelles technologies pour la formation, la synthèse d'études, principalement en ergonomie et en psychologie, fait ressortir les éléments et principes suivants.

Efficacité : apprentissage ou motivation?

Peu d'indicateurs réels, peu d'investigations approfondies ou écologiques, ainsi que la relative diversité des outils et domaines cibles abordés rendent difficile la lecture des bénéfices associés à l'usage individuel des TICEs. C'est moins l'efficacité en termes d'apprentissage qu'en termes de motivation et de satisfaction qui transparaît des quelques premiers résultats d'études.

Par exemple, chez les étudiants utilisateurs de Perseus (Neuman et al., 1995), le rappel d'exemples est quantitativement meilleur, mais la compréhension du domaine ne semble pas améliorée. Les auteurs soulignent cependant que l'absence de résultats probants provient à leur avis du fait qu'il reste encore à élaborer les tâches et consignes les plus adaptées pour amener les étudiants à utiliser pleinement et efficacement les possibilités des environnements multimedia.

Boling et Robinson (1999) comparent expérimentalement trois types d'activités d'apprentissage dans le cadre de la formation à distance : l'apprentissage individuel à partir de notes prise en cours, la coopération induite par une consigne de travail en groupe, l'utilisation individuel d'un logiciel multimédia interactif. L'analyse des résultats montre que la condition de coopération engendre de meilleurs résultats en termes d'apprentissage que la condition multimédia interactif⁶ individuel et la condition travail individuel. Par contre, les sujets les plus satisfaits sont ceux ayant utilisé le multimédia interactif.

Plusieurs hypothèses sont envisageables pour expliquer cet aspect de satisfaction et de motivation liées au multimédia interactif. L'usage même des technologies avancées et l'effet de nouveauté en constituent peut-être l'une des origines. La dimension ludique est également souvent avancée comme explication. Au-delà de ces effets liés à l'informatique, il semble qu'à travers plusieurs études, l'usage de l'animation ait un effet généralement positif sur la motivation des apprenants (Bétrancourt & Tversky, 2000). Les apprenants préfèrent apprendre avec un agent pédagogique intégré dans le multimédia, plutôt que sans (Moreno, Mayer, Spire, & Lester, 2001). L'interactivité et l'usage du graphisme n'augmente pas systématiquement le niveau de satisfaction des apprenants, par comparaison avec les présentations statique et alphanumérique (Liu, Salvendy, & Kuczek, 1999).

L'animation : un usage à cibler

Une synthèse récente (Bétrancourt & Tversky, 2000) s'intéresse à l'effet de l'animation⁷ informatique sur les performances des utilisateurs dans différents contextes (logiciel d'apprentissage, systèmes d'aide, etc.). Les résultats des études recensées sont

⁶ Pour les auteurs, ce résultat qu'ils jugent décevant, s'expliquerait peut-être par le fait que le matériel multimédia serait trop simple, ainsi qu'insuffisamment adapté à la nature de la tâche.

⁷ Les auteurs proposent la définition large de l'animation suivante : "toute application logicielle qui génère une série d'images, de sorte que chaque image apparaisse comme une modification de la précédente, et que cette séquence soit déterminée par le concepteur ou par l'action de l'utilisateur".

mitigés, et d'autres travaux empiriques sont nécessaires pour mieux cerner l'effet de facteurs souvent confondus tels que l'interactivité ou le type d'information représentés à travers l'animation. Quelques principes utiles du point de vue de la conception peuvent être formulés en l'état actuel des recherches.

L'animation est probablement efficace pour présenter des relations dynamiques impliquant des changements dans le temps (mouvement, trajectoire, évolution temporelle) ; dans les autres cas, l'animation peut avoir pour effet une surcharge cognitive de l'apprenant, voire ne pas être utilisée et traitée (Bétrancourt & Tversky, 2000).

L'efficacité de l'animation est également liée à la qualité et la concision de l'appariement (Bétrancourt & Tversky, 2000) entre l'information cible et sa transposition sous la forme de l'évolution dynamique des caractéristiques des objets affichés (couleur, taille, forme, position, déplacement...).

Intérêt d'un agent pédagogique dans l'interface

Dans une série d'expériences, Moreno et al. (2001) cherchent à préciser l'effet d'un agent pédagogique animé sur l'apprentissage assisté par ordinateur. Il semble que ce n'est pas le réalisme de l'avatar, mais l'activité qu'engendre l'interaction avec l'avatar qui constitue son intérêt essentiel.

Les auteurs trouvent en effet que, le fait que l'environnement impose une coopération active entre l'apprenant et l'agent, fait que les apprenants sont engagés plus activement dans le traitement du matériel ; cela expliquerait probablement en partie les meilleures performances d'apprentissage. L'autre résultat intéressant est que le degré de réalisme de la représentation visuelle de l'agent n'a pas d'effet sur l'apprentissage : les performances sont peu différentes suivant que l'avatar ait l'apparence d'un personnage de fiction exhibant peu de comportement de « communication sociale », ou qu'il s'agisse d'un visage humain réel (vidéo) exhibant un comportement social de communication fort (fixation du regard durant l'explication).

Enfin, la lecture auditive des messages en provenance de l'agent a un effet bénéfique sur l'apprentissage, par comparaison avec les mêmes messages présentés sous la forme de texte à l'écran. Selon les auteurs, l'usage de la modalité auditive pour fournir des explications sur les documents présentés à l'écran permet de diminuer la surcharge de la mémoire de travail relative à la mémoire visuelle.

Influence des caractéristiques de l'interface

Utilisabilité. Neuman et col. (Neuman et al., 1995) observent une corrélation négative forte entre les difficultés liées à l'utilisation de l'interface, et d'une part la performance en termes d'utilisation effective, et d'autre part le degré de satisfaction des utilisateurs. Leur étude porte sur le suivi de l'utilisation d'une base de données multimédia sur le monde grecque.

Manipulation directe vs langage de commande. L'interaction par un langage de commande induit de meilleurs résultats d'apprentissage que l'interaction par manipulation directe, avec un logiciel de simulation à l'aménagement d'ambiances lumineuses (Guttormsen Schär, Stoll, & Krueger, 1997). Le type d'interface influence la stratégie et le mode d'apprentissage, d'une part, la qualité de l'apprentissage d'autre part. L'interface de manipulation directe induit en effet une stratégie de plus d'essais et erreurs, en même temps que par des temps de réflexion plus courts entre chaque essai ; l'utilisation du langage de commande s'accompagne d'un moins grand nombre d'essais par tâche et de plus de temps passé avant de réaliser chaque nouvel essai. A l'issue de la session de formation avec le logiciel de simulation, deux mesures de

l'apprentissage sont utilisées : d'une part les apprenants ont à résoudre un problème d'aménagement de l'ambiance lumineuse pour un poste ; d'autre part, il leur est demandé de rédiger un court paragraphe expliquant les principes de l'aménagement d'une ambiance lumineuse. Les résultats montrent une supériorité de la condition langage de commande sur la condition manipulation directe, à la fois en termes de performance, et à la fois en quantité de principes correctes exposés.

Présentation graphique vs alphanumérique de concepts de calcul. Liu et col. (Liu et al., 1999) étudient l'effet, sur l'apprentissage, de la présentation "graphique" des valeurs associées à des notions abstraites de statistiques⁸ (sous forme de nuages, de barres ou d'histogrammes), par comparaison à une présentation "alphanumérique" (seules les valeurs numériques sont affichées dans des boîtes). Un second facteur, croisé avec le précédent, vise à comparer une version statique (un texte expliquant les notions associé à des graphiques illustratifs) avec une version "interactive" où l'utilisateur peut manipuler les paramètres propres à la notion, de façon à observer à l'écran l'incidence de leur variation. Si la simulation interactive engendre une meilleure performance d'apprentissage, il n'apparaît pas globalement de différence suivant le format de présentation des paramètres. L'analyse post-test montre toutefois que, pour les notions les plus complexes à acquérir, le groupe utilisant la version alphanumérique et interactive du tutoriel obtient de meilleurs résultats que les autres groupes. Par ailleurs, ce meilleur groupe est aussi celui qui passe en moyenne le plus de temps à utiliser le tutoriel.

Structuration des informations à l'intérieur d'un texte. Les travaux de Caro (Caro & Bisseret, 1997) portent sur l'effet de différentes modalités de mise en forme textuelle des propositions d'un texte en fonction de leur valeur illocutoire. Les auteurs comparent l'apprentissage consécutif à différents types de mises en formes du texte, aussi bien dans le cas de la lecture de textes papier et que de la lecture de textes informatisés. Les auteurs examinent également une tâche de recherche d'information. Les principaux résultats suggèrent un traitement cognitif différencié, en fonction du degré d'acquisition de la lecture chez le sujet, selon que l'information utilise ou non un format de mise en retrait (parenthèse, notes de bas de page, etc.). Cependant, alors que les indicateurs de mise en retrait ont effectivement cette fonction sur un support papier, il semblerait que l'effet soit inverse dans le cas de leur équivalent numérique (escamots).

Des domaines d'application privilégiés?

Les EAO traditionnels seraient surtout applicables aux domaines où le contenu à apprendre est factuel, avec des buts et des objectifs spécifiques (Eberts, 1997, p 829).

La logique de présentation hypertexte serait déconseillée pour l'apprentissage de procédures, en l'absence d'exercices, ainsi que pour toute activité impliquant la recherche d'éléments de détails (Tricot, 1995, p 24).

Des études déjà anciennes ont souligné également l'interaction entre la méthode, l'organisation du matériel et le domaine cible de la formation du point de vue de l'efficacité de l'apprentissage (e.g. Régnier & de Montmollin, 1968). Cette question est à nouveau discutée dans le contexte des technologies plus actuelles, par exemple la structuration des hypertextes (e. g. Tricot & Bastien, 1996).

II.3 Éléments pour l'analyse ergonomique des situations et outils actuels

La seule analyse d'un outil, de ses fonctions et de ses caractéristiques est insuffisante pour évaluer sa dimension ergonomique : un outil n'est pas ergonomique en soit, il est

⁸ Somme des carrés, degrés de libertés, carrés moyens, etc.

ergonomique dans la mesure où il est parfaitement adapté à un contexte d'usage, à un profil d'utilisateur et à sa tâche. Le choix et l'analyse d'un nouvel outil et de son usage amène notamment à questionner à quatre pôles de conséquences possibles :

- les adaptations et modifications entraînées au niveau de l'organisation ;
- les compétences nécessaires et attendues chez les différents acteurs du processus de conception du fait de ces modifications et de l'usage des outils ;
- les modifications entraînées sur le matériel ;
- les tâches.

Les spécificités associées au domaine de la formation amènent à préciser en outre quatre éléments pour l'analyse ergonomique des situations et outils actuels. Ils sont évoqués dans les titres suivants.

II.3.1 Le formateur et l'apprenant

La place négligeable faite à l'hypertexte et à l'EIAO (enseignement intelligent assisté par ordinateur) dans l'éducation, au début des années 90, s'expliquerait en partie par les difficultés rencontrées par les enseignants/formateurs, non formés à la programmation informatique, pour utiliser les systèmes auteurs qui leur étaient proposés, ainsi que par le manque de fonctionnalités adaptées aux différentes phases de leur activité (Abdat & Madaule, 1993). Cet abandon, un peu forcé, des pédagogues et des professionnels du champ de la programmation de l'apprentissage expliquerait peut être la médiocrité et la faible couverture des disciplines par les systèmes produits à cette époque, facteur qui explique également l'échec du plan français « Informatique pour tous » selon Grandbastien (1993).

Afin d'éviter la réitération de telles erreurs, la dimension de l'activité des formateurs devrait donc être considérée à part entière, en même temps que celle des apprenants (Burkhardt et al., 1998). Un argument complémentaire est que le formateur est le perscripteur essentiel en ce qui concerne l'usage réel d'un outil par les stagiaires ; la prise en compte des formateurs apparaît donc sensible également à l'étape d'intégration sur le terrain.

La conception d'outils de formation avec les nouvelles technologies devrait ainsi systématiquement tenir compte de cette **double orientation fonctionnelle liée à l'existence de (au moins) deux catégories d'utilisateurs très différents** : d'une part les formateurs, et d'autre part ceux qui apprennent avec le système.

II.3.2 Des configurations variées de situations

Grandbastien (1993) a analysé l'insertion des nouvelles technologies dans l'éducation au début des années quatre-vingt. Elle distingue entre plusieurs modes d'utilisation des nouveaux systèmes pour l'enseignement/l'apprentissage :

- l'ordinateur en tant que simultanément support et objet du cours (cours d'informatique, apprentissage des outils de bureautique, etc.);
- l'ordinateur en tant qu'outil pour le formateur (outils d'aides à la préparation des cours, de documents de cours (textes et graphique), gestion d'informations concernant les apprenants et autres tâches à caractère plus ou moins administratif;
- l'ordinateur pour le formateur et le groupe d'apprenants ; selon deux "modes" : soit un seul ordinateur utilisé par l'enseignant, devant les apprenants (démonstration, etc.) ; soit un (ou plusieurs) ordinateurs et une ressource commune pour les apprenants. Il peut alors s'agir de travail coopératif, ou bien individuel.

- l'ordinateur pour l'apprenant seul (i.e. sans le formateur).

Cette classification fait apparaître un croisement entre deux dimensions qui s'appliquent plus généralement aux nouvelles technologies de formation.

La première concerne le **statut de l'artefact technique vis à vis du processus de formation** ; l'artefact à la fois support et objet/sujet de la formation s'oppose ici à l'artefact médiateur indépendant du contenu. A notre connaissance, cette dimension est peu analysée à travers la littérature technique/ et ou ergonomique sur les nouvelles technologies de formation.

La seconde dimension décline **quelques combinaisons possibles de relations impliquant l'ordinateur, les apprenants, et les enseignants**. L'analyse ergonomique de l'existant nécessite de formaliser systématiquement ces aspects critiques de la situation de formation faisant usage de la technologie (Burkhardt et al., 1998).

La situation peut être décrite d'un point de vue social, temporel et spatial à travers d'une part les relations entre pairs, et d'autre part les relations avec d'autres acteurs de la formation (Tableau 1). Il est difficile, en effet, de prétendre à l'analyse générique de situations d'usage aussi disparates pour l'apprenant et le formateur que la situation de travail personnel, la situation de travail en groupe, le tutorat, le travail en binôme, etc. La situation est également caractérisée par la proximité des relations entre les acteurs à l'intérieur de cette configuration. La proximité peut caractériser une distance temporelle (synchrone vs asynchrone) en même temps que géographique (distribué vs local) ; pratiquement, trois schémas parviennent à décrire ce dernier aspect : local vs distribué par salle vs distribué par poste.

Appellation "classique"	Cadre social /pairs	Proximité spatiale	Proximité temporelle	Cadre social / acteurs pédagogique	Proximité spatiale	Proximité temporelle
Autoformation	Individuel	Local	Simultané	Autonome/ Tuteur/ Expert/ Administration	Local/ Distribué	Simultané/ Désynchronisé
Binôme	Binôme	Local/ Distribué	Simultané/ Désynchronisé	Autonome/ Tuteur/ Expert/ Administration	Local/ Distribué	Simultané/ Désynchronisé
Travail en groupe/ équipe	Petit groupe	Local/ Distribué	Simultané/ Désynchronisé	Autonome/ Tuteur/ Expert/ Administration	Local/ Distribué	Simultané/ Désynchronisé
Enseignement de masse	Grand groupe	Local/ Distribué	Simultané/ Désynchronisé	Autonome/ Tuteur/ Expert/ Administration	Local/ Distribué	Simultané/ Désynchronisé

Tableau 1 Matrice des configurations socio-pédagogiques, spatiales et temporelles des situations de formation avec ou sans nouvelles technologies

Un processus de formation professionnelle inclut souvent plusieurs de ces configurations articulées à l'intérieur d'un cursus ; la compatibilité et la capacité des outils à soutenir les tâches et l'activité dans cet ensemble de configurations constituent des éléments important dans la définition de projets avec les nouvelles technologies. Les caractéristiques de la configuration sociale, spatiale, temporelle et pédagogique de

la situation de formation introduisent des exigences différentes sur l'activité ; elles devraient être précisées systématiquement pour évaluer et concevoir des outils qui soient adaptés.

II.3.3 Tâches et activités

La définition des *tâches* associées à l'activité des différents utilisateurs est peu considérée par la littérature, au profit de la description précise de l'artefact lui-même. Pourtant, il s'agit d'un aspect critique pour la définition de tout outil de formation (Burkhardt et al., 1998). De même, l'analyse de l'activité dans ces situations est peu souvent réalisée, et le cas échéant rarement de façon fine et précise.

Dans le domaine du multimédia de formation en particulier, on remarquera souvent la faiblesse, voire la naïveté des modèles de l'apprentissage (souvent implicites) utilisés pour leur conception : lecture de contenu à l'écran, parcours d'une arborescence où les nœuds sont tacitement associés à de la « connaissance, etc. De même, les tâches assignées aux apprenants dans les Environnements Virtuels de Formation, relèvent pour l'essentiel de la navigation et de la visite.

Du point de vue de l'apprenant, une spécificité réside très souvent dans la triple dimension **tâche de référence** à apprendre, **tâches formatrices⁹ utilisées** et **tâches élémentaires d'interaction** avec les outils. Shepherd et Kontogiannis (1998) proposent un modèle cognitif de la réalisation de tâches en situation d'apprentissage, avec pour objectif de faciliter la conception de situations de formation plus efficaces.

Une question peu abordée dans le domaine des technologies d'apprentissage concerne les processus mis en œuvre par l'apprenant dans la régulation autonome de son activité. Elle apparaît pourtant importante, notamment (mais pas seulement) dans le cadre des activités prenant comme cadre l'autoformation. Lorsqu'un sujet est laissé libre d'étudier un matériel jusqu'à ce qu'il estime l'avoir appris « parfaitement », les études psychologiques (voir e.g. Le Ny & Denhière, 1974) montrent que le temps consacré à l'étude de chaque nouvel item restant à apprendre diminue au fur et à mesure que le sujet avance dans le matériel. Il est également généralement trouvé que le « sentiment de savoir » tend à surestimer le savoir « réel », même si les deux apparaissent souvent corrélés. Ces effets robustes ont donné lieu à des interprétations en termes d'accroissement de la fatigue, de diminution de la motivation à apprendre, ou d'interférences entre les traitements cognitifs au cours de l'apprentissage à proprement parlé, ou encore relativement au processus amenant à l'estimation du niveau d'apprentissage atteint. L'influence de la méthode pédagogique utilisée avant le travail personnel de l'apprenant est aussi mentionnée dans la littérature pédagogique. Par exemple, Goguelin (1987) souligne que la nécessité de répétitions et d'entraînement est généralement clairement perçue par les apprenants dans le cadre des méthodes affirmatives, ce qui n'est pas vrai par exemple avec les méthodes interrogatives : les stagiaires peuvent avoir le sentiment d'avoir compris avec ces dernières, parce qu'ils ont trouvé le résultat, alors que l'essentiel (i.e. la structure du raisonnement) a été soufflée par le formateur, avec le risque de ne pas percevoir le besoin de répétition et la nécessité d'apprendre.

Du point de vue du formateur (individuel ou plus largement l'équipe), les **tâches associées à la conception** et la programmation a priori de la formation doivent être analysées, en même temps que doivent être identifiées **celles liées à l'administration et au déroulement** de la formation. Eventuellement on peut distinguer le suivi et

⁹ Incluant à la fois la *transposition didactique* (terme souvent utilisé dans le domaine de la simulation pour la formation) de la tâche de référence et les tâches ou consignes complémentaires servant à guider l'activité de l'apprenant.

l'évaluation du résultat de la formation ; cette dernière phase peut être considérée comme un troisième groupe de tâches.

II.3.4 Validation-évaluation de l'apport d'une technologie à l'apprentissage et la formation

La difficulté liée à la comparaison de méthodes d'instruction différentes est un questionnement récurrent dans le domaine de la formation, transcendant le simple développement technologique. Cette difficulté tient notamment au fait que :

- il est souvent difficile de déterminer si l'échec en termes d'apprentissage provient d'un mauvais contenu à apprendre ou de la technologie utilisée (Eberts, 1997, p 828), ou encore d'une inadéquation entre le contenu et la technologie utilisée.
- comparer l'effet de médias différents (e.g. animation vs texte) rend généralement impossible le maintien d'une équivalence de tous les facteurs entre les conditions (Bétrancourt & Tversky, 2000).
- l'utilisation de la seule mesure de l'apprentissage débouche souvent sur des gains et des différences décevants par leur faiblesse. Ainsi, à la lecture de l'étude de Boling et Robinson (1999), il apparaît que c'est le niveau initial de connaissances de l'étudiant qui explique la très grande partie des différences de performances observées à l'issue de chacune des conditions expérimentales comparées. Eberts (1997, p 829) souligne que le gain réel par rapport au présentiel se trouve souvent dans la réduction du temps en formation pour les apprenants – et pour les formateurs. Sur la base d'une revue de plusieurs études menées entre 1977 et 1993, l'auteur observe ainsi des proportions allant de 17% à 64% de réduction en temps d'instruction, du fait de l'individualisation liée à l'introduction d'un EAO, par comparaison avec la situation de cours conventionnelle, en présence. Toutefois, ce gain de temps peut parfois disparaître avec des systèmes plus complexes de type tuteur intelligent.
- la diversité des facteurs en jeu¹⁰ rend peu probable l'apparition d'un effet opposant des modalités expérimentales simples telles que présentation statique/dynamique ou encore illustration/sans illustration (Bétrancourt & Tversky, 2000) ; en outre, tout éventuel effet notable est généralement difficile à expliquer.

Une difficulté parallèle est la diversité des situations de référence dans laquelle prend pied le développement de ces technologies. Il convient de l'explicitier dans la mesure où elle oriente fortement l'évaluation et le type de validation à réaliser, par exemple :

- améliorer les conditions de formation par rapport à l'isolement du télé-enseignement traditionnel ;
- remplacer toute ou partie d'une formation présentielle ;
- offrir une formation qui n'existe pas, etc.

Les références implicites et explicites des différents interlocuteurs sont importantes à analyser, dans la mesure où ces références sous-tendent de nombreuses attitudes positives ou négatives vis à vis des nouvelles technologies pour la formation. Suivant la situation de référence, l'aune de l'évaluation sera évidemment différente.

¹⁰ Domaine d'apprentissage, contenu particulier à apprendre, pédagogie spécifique, facteurs propre à la situation d'étude, types d'indicateur pour évaluer l'apprentissage...

III État de l'art de l'utilisation de la réalité virtuelle pour la formation

Le cas des simulateurs de réalité virtuelle est en particulier illustratif de la situation des nouvelles technologies pour la formation (NTF), dans la mesure où la technologie du virtuel a été largement promue par les médias alors qu'actuellement encore, peu de recul existe dans le domaine. Beaucoup d'hypothèses, souvent floues, et rarement argumentées sur la base de données empiriques sont rencontrées dans la littérature. On distingue souvent difficilement, dans les succès ou les échecs qui sont relatés, la part de paramètres tels que la situation de formation, les objectifs de formation poursuivis, la méthode de conception du contenu, voire l'ergonomie des dispositifs.

Les éléments et les réflexions introduits dans la partie précédente sont une première base que vient enrichir la littérature plus proprement orientée vers cette technologie du virtuel.

III.1 La réalité virtuelle

Né au début des années 70, le domaine de recherche communément désigné par les termes de "réalité virtuelle" développe un ensemble de technologies innovantes avec l'ambition d'offrir une interaction " plus naturelle " aux utilisateurs de systèmes informatiques. Popularisée par les médias, ces travaux se sont centrés sur le développement de périphériques et d'interfaces multimodales de navigation et de manipulations en trois dimensions : casque ou écrans 3D, gants de manipulations, systèmes avec retours d'effort, etc.

L'objectif de cette partie n'est pas d'entrer ici dans les discussions que ne cessent d'alimenter cette expression mise tantôt au singulier (Burdea & Coiffet, 1993) et tantôt au pluriel (Cadoz, 1994b). Dans la pratique, deux approches principales se réclamant de la réalité virtuelle coexistent que, pour simplifier, nous qualifierons de " technologique " pour la première et " d'éducative " pour la seconde [Burkhardt, 2002 #765].

Majoritaire, l'approche " technologique " a pour finalité de fournir à l'utilisateur l'accès à un monde artificiel réaliste ou réel à travers une stimulation isomorphe à celle du monde réel, par le biais d'un ensemble de techniques informatiques couvrant une ou plusieurs modalités sensorielles (voir par exemple Adams & Lang, 1995; Frejus & Drouin, 1996; Loftin et al., 1994). L'ambition affichée est de faire ainsi " disparaître " l'interface par l'intermédiaire des technologies de la réalité virtuelle ; ces dernières, vues comme l'aboutissement ultime des interfaces de manipulation directe, devraient, dans l'idéal, permettre d'offrir un mode d'interaction " naturel " aux utilisateurs. Le qualificatif de " technologique " traduit ici le fait que l'essentiel de l'effort de recherche se concentre sur la mécanique et l'algorithmique de ces nouveaux dispositifs, prenant peu en compte les caractéristiques de l'activité humaine, sinon de façon superficielle. Cette approche se fonde principalement sur trois domaines de la technologie (Fuchs, 1996) : l'infographie et la synthèse d'image ; la robotique et la télé-opération ; la simulation temps réel.

La réalité virtuelle " éducative " correspond aux travaux dont la finalité est de fournir à des utilisateurs la possibilité de construire et de contrôler les paramètres d'un monde plus ou moins imaginaire de façon interactive, au moyen d'un système informatique en permettant la représentation. Ce monde virtuel peut être une création contrôlée par l'utilisateur (e.g. Bricken & Byrne, 1992), ou correspondre à la mise en image de

concepts abstraits comme les règles de la physique (e.g. Byrne, 1996 ; Dede, Salzman, & Loftin, 1996). Moins médiatique, cette approche surtout développée dans l'éducation s'intéresse moins directement à la couche perceptive du système¹¹, mais plutôt aux possibilités de représentation, d'interaction voire de coopération offertes à l'apprenant, comme par exemple le contrôle explicite d'un sous-ensemble de paramètres à l'intérieur de la simulation d'un monde en évolution. L'ambition de cette famille de systèmes est d'utiliser au mieux les ressources de la technologie informatique (réseau, graphisme et animation, son) pour offrir à l'apprenant un environnement d'apprentissage (inter-)actif. Les domaines de la technologie qui fondent cette approche sont principalement l'informatique pédagogique, les réseaux, et enfin l'infographie et la synthèse d'image.

Cette tentative de typologie ne doit pas masquer la diversité des systèmes et des recherches qui forme le paysage du domaine. Certes, on trouvera des illustrations claires de l'une et l'autre des approches dans la littérature. Toutefois, les travaux et réflexions les plus récents font suggérer une évolution dans les approches qui, d'une part intègrent de plus en plus la préoccupation de proposer des systèmes de mieux en mieux adaptés aux utilisateurs et à leur activité, et d'autre part considèrent sérieusement d'autres alternatives que la seule re-création d'images synthétiques ressemblant au monde réel (en particulier pour ce qui est du domaine de la formation, voir par exemple Lourdeaux, 2001; Mellet d'Huart, 2001a). Soulignons toutefois que cette relative absence de liens entre les deux approches est en particulier critique pour le domaine de la formation, les modèles, les connaissances et les technologies développées par chacune trouvant là un terrain « naturel » pour la complémentarité.

III.1.1 Architecture et interfaces des Environnements Virtuels (EV)

La réalité virtuelle exploite et développe actuellement quatre catégories de dispositifs d'interaction : les dispositifs de capture de position et de mouvement (capteurs, gant, combinaison ...) ; les dispositifs de présentation visuelle (grand écran, casque,...) ; les dispositifs de retour proprioceptifs et cutanés (touché, chaleur, ...) ; les dispositifs d'entrée et de présentation sonore (son spatialisé, reconnaissance vocale,...). Fuchs (1996) parle à ce propos d'interfaces comportementales, soulignant ainsi l'orientation des recherches vers la conception de systèmes " visant à exploiter un comportement humain, naturel et sans acquis préalable ". Des configurations variées de ces dispositifs existent, en association éventuelle avec des dispositifs plus traditionnels (souris, clavier, menu déroulant,...), formant ainsi des systèmes interactifs particuliers – les environnements virtuels (EV) - conçus pour recréer certaines des sensations et expériences qui caractérisent l'environnement du monde réel (Witmer & Sadowski, 1998).

Schématiquement, l'architecture d'un EV comprend trois parties fonctionnellement distinctes : les dispositifs de présentation d'information (visuelle, auditive, haptique etc.) ou "effecteurs", les dispositifs d'entrée d'information (position, gestes et mouvements, etc.) ou "senseurs" et le moteur de réalité virtuelle proprement dit (Coiffet, 1997 ; Ellis, Begault, & Wenzel, 1997).

Ce dernier correspond au système matériel (généralement une station de travail graphique ou un PC) et aux logiciels de gestion et de mise à jour de la présentation en fonction des entrées de l'utilisateur ; il comprend généralement une base de données modélisant la scène virtuelle, un modèle des interactions et une représentation de

¹¹ Les premiers systèmes, inspirés par les jeux de rôles, sont d'ailleurs munis d'interfaces textuelles ce qui les a fait souvent qualifier de "text-based virtual reality", par opposition à ceux développés pour des environnements graphiques.

l'utilisateur. Des ressources supplémentaires peuvent être associées à travers un réseau, dans le cadre d'un système multi-utilisateurs par exemple, ou pour des applications de télé-opération lorsque la scène virtuelle représente un lieu réel.

III.1.2 Applications actuelles

De nombreuses applications commerciales commencent à être proposées dans les domaines de l'ingénierie, la médecine, l'éducation et le loisir (e.g. Adams & Lang, 1995; Loftin et al., 1994). En Europe, cinq branches de l'industrie concentrent l'essentiel des développements actuels : la construction automobile ; l'aviation et l'industrie aérospatiale ; la médecine ; l'industrie nucléaire ; l'industrie chimique (Syseca, 1998a). Les systèmes sont utilisés pour la démonstration, la conception, la formation et l'apprentissage (Youngblut, 1998), le diagnostic et la thérapeutique (Jullien, Defrance, & Nugues, 1999). Ce dernier usage concerne l'élaboration de situations expérimentales et difficiles à reproduire, ainsi que l'aide thérapeutique : évaluation, exposition, désensibilisation etc.

III.1.3 Trois dimensions caractéristiques des environnements virtuels : tentative de définition

Les notions *d'immersion*, de *présence* et de *réalisme* constituent trois dimensions clef de la recherche et de l'application dans le domaine des EV, malgré l'ambiguïté, les collisions de sens et l'absence de définition formelle qui caractérisent encore parfois leur usage. L'objectif est ici de les présenter dans une perspective à la fois opérationnelle et cohérente du point de vue théorique.

Immersion

Formellement, *l'Immersion*¹² peut se définir comme le degré avec lequel l'interface du système contrôle les entrées sensorielles pour chaque modalité de perception et d'action ; elle peut se décrire dans les termes des dispositifs logiciels et matériels particuliers utilisés. De ce point de vue, les systèmes actuels exploitent la modalité visuelle pour l'essentiel de l'information en sortie (écran 2D ou 3D, casque, salle de réalité virtuelle, etc), plus rarement le son (Psootka, 1995) ; en pratique, le retour d'effort ou les sensations olfactives ne sont pas encore présents dans les systèmes (Youngblut, 1998). Le mouvement ou le geste constituent les modalités les plus courantes en entrée (capteur de position, souris 3D, souris 2D, joystick, gant).

Pour un système considéré, le niveau d'immersion se caractériserait par le sous-ensemble des modalités mises en œuvre dans l'interaction, par le degré de complétude et la qualité des dispositifs d'interaction à travers chacune des modalités visées, par la cohérence interne de l'information et des réactions du système. Une dichotomie usuelle du domaine consiste d'ailleurs à opposer les systèmes dits "immersifs" (casque, CAVE) avec ceux "non immersifs" (écran distant, souris).

Présence

La dimension de *présence* est un concept visant à caractériser l'expérience perceptive et cognitive de l'utilisateur dans le cours de son activité avec un EV. La recherche d'un degré élevé de *présence* caractérise en effet l'orientation de nombreux travaux dans le domaine, notamment avec l'idée qu'elle facilite la performance ou l'apprentissage des

¹² Des formules couramment utilisées sont par exemple " immersion dans un monde virtuel ", " interfaces et systèmes immersifs ", " utilisateur immergé " etc.

utilisateurs. Cette hypothèse reçoit toutefois un soutien mitigé du fait du caractère contradictoire des résultats dans la littérature, voire de l'absence de résultats. Cependant, deux remarques font relativiser cet état de chose. La première est que l'analyse de cette dimension nécessite de s'appuyer sur une méthodologie solide en même temps qu'elle doit faire référence aux théories du comportement et de la cognition humaine, ce qui n'a pas toujours été le cas. La deuxième remarque concerne la diversité des usages et le flou avec lesquels le terme de *présence* a pu être utilisé pendant longtemps. Ainsi, la *présence* a pu désigner l'effet de faire percevoir comme réels ou vivants les objets, événements ou personnages avec lequel l'utilisateur interagit dans l'EV. Dans cette perspective, le degré de *présence* est ainsi souvent assimilé au degré de réalisme (social, perceptif, cognitif) du système. Une autre acception a trait à la déformation de la perception de l'espace chez les utilisateurs ; Lombard et Ditton (1997) relèvent trois types de déformation : l'illusion de quitter l'espace réel et d'être transporté dans l'espace engendré par l'EV ; l'illusion que l'espace engendré par l'EV s'introduit et envahit pour partie l'espace réel ; l'illusion d'être proche et de partager un même espace commun avec plusieurs utilisateurs distants. D'autres acceptions existent. Le degré de *présence* est parfois assimilé au degré d'immersion, ou encore à l'effet psychologique en résultant. Avec une perspective plus psychosociologique, le concept de *présence* est également utilisé d'une part pour caractériser le degré avec lequel la perception sociale est favorisée par le système, et d'autre part le statut social attribués par les utilisateurs au média lui même ou à certains objets qui y sont représentés. Lombard et Ditton (1997) en proposent une définition large en tant qu'*illusion de non-médiation ressentie par l'utilisateur d'un système* (EV, téléconférence, jeu en réseau etc.) soit parce que le système devient invisible et fonctionne comme une fenêtre ouverte sur le monde et d'autres utilisateurs, soit parce que le système n'est pas perçu comme un média par l'utilisateur mais se voit assigner un certain statut d'entité sociale. Dans le domaine de la conception d'EV, la modélisation cognitive de cette dimension de *présence* est actuellement une question de recherche, plusieurs approches sont déjà proposées (voir e.g. Draper, Kaber, & Usher, 1998; Regenbrecht, Schubert, & Friedman, 1998; Verna & Grumbach, 1998a).

Réalisme

La dimension du *réalisme* qualifie fréquemment les EV, voire constitue l'une des finalités de leur conception pour prétendre à un EV de qualité. Ainsi, le réalisme est par exemple le premier critère utilisé pour la description des EV examinés dans le cadre du projet européen VR for Europe (voir Syseca, 1998a) ; un système réaliste étant défini comme présentant, en temps réel, une qualité graphique proche de la réalité. En regard de ce critère, la moitié des EV analysés dans cette étude sont qualifiés d'un bas niveau de réalisme (basic rendering), les auteurs considérant que l'évolution technologique devrait permettre d'améliorer ce réalisme.

Le recours à la notion de réalisme est problématique au delà de son caractère intuitif et peu formel dont l'une des conséquences est que personne ne partage la même définition ni les mêmes critères. D'une part, il s'agit d'une notion mal définie dans le contexte des études en réalité virtuelle, tantôt référant à une identité métrique ou perceptive entre l'espace réel et l'espace artificiel engendré par l'EV, tantôt référant à des ressentis subjectifs des utilisateurs. D'autre part, le réalisme réfère souvent en pratique au domaine perceptif et particulièrement visuel ; on devrait de ce fait parler plutôt de photoréalisme. Malgré tout, le succès même de la notion de réalisme traduit la nécessité d'avoir à décrire, de façon fine et précise, les rapports qu'entretiennent l'espace engendré par l'EV et certains aspects du monde réel. Pour satisfaire à cette nécessité, la notion de fidélité permet de préciser les multiples facettes que tend à masquer la dimension du *réalisme*. La fidélité est d'abord une notion moins connotée vers le domaine perceptif que la précédente. En outre, il s'agit d'une notion discutée et

caractérisée dans d'autres domaines, comme celui de la simulation par exemple (e.g. Grau et al., 1998; Leplat, 1997). Plusieurs types de fidélité peuvent être ainsi évoqués : fidélité quant aux propriétés physiques et fonctionnelles des situations de référence, fidélité perceptive (visuelle; sonore; tactile; haptique; spatiale), fidélité temporelle caractérisant d'une part l'évolution dynamique des objets et propriétés de l'EV, et d'autre part les contraintes sur l'activité de l'utilisateur, fidélité de la tâche à réaliser, et enfin fidélité psychologique, c'est-à-dire « la mesure selon laquelle le simulateur produit un comportement semblable à celui exigé dans la situation réelle » (Leplat, 1997, p 173). Si l'obtention d'un niveau précis de fidélité est souhaitable pour certains usages des EV, il n'existe pas néanmoins de lien directe entre le niveau de fidélité et le niveau de performance ni même la validité psychologique de l'EV. Les caractéristiques de fidélité intrinsèques d'un EV ne sont d'ailleurs pas seules responsables du niveau de fidélité psychologique puisque viennent s'ajouter l'effet des caractéristiques de l'utilisateur ainsi que la tâche choisie dans le cadre des objectifs assignés à l'usage de l'EV.

III.2 Usage de la RV en formation

III.2.1 Types d'usage et intérêt de la réalité virtuelle pour la formation

En pratique, deux orientations des EV pour la formation coexistent : d'une part les EV "outil du formateur" qui ont pour objectif d'être utilisés par l'animateur de la formation ; d'autre part les EV ayant comme finalité d'être utilisés directement par l'apprenant, proposant ainsi une interaction didactique individuelle, voire en groupe et à distance.

Outil à destination du formateur

Ce premier usage considère l'EV comme un outil du formateur. Peu médiatique et investie par la recherche, cet usage s'avère pourtant porteur d'efficacité dès lors que les fonctionnalités et les dialogues sont pensées en fonction de l'usage en formation, selon une démarche centrée-utilisateur. Fréjus (Fréjus, 1998; Fréjus, Drouin, Thibault, & Schmid, 1997) montre par exemple qu'un EV constitue un outil plus adapté que le support traditionnel, dès lors que sa conception se fonde sur une analyse des futurs utilisateurs et de leur activité. Cet auteur compare l'activité de formateurs utilisant soit un simulateur de réalité virtuelle, soit des outils classiques basés sur l'exploitation de transparents. A partir de l'analyse des interactions entre le formateur et les stagiaires dans les deux situations, l'auteur montre notamment que l'EV fournit une partie de l'explication et pas seulement une illustration dans le cas où il s'agit d'appréhender des systèmes complexes dans leur dynamique, comme par exemple les principes et dysfonctionnement d'un robinet dans une centrale nucléaire. Enfin, l'outil offre au formateur un moyen d'opérer des transitions, de résoudre certaines difficultés ou incompréhensions liées au langage et au caractère statique des documents imprimés, de suggérer des indices, de valider ou infirmer les réponses des stagiaires en proposant une nouvelle piste à la réflexion dans le cadre d'une pédagogie plus active.

Outil à usage didactique pour l'apprenant

Ce deuxième usage est vraisemblablement le plus répandu actuellement. Une distinction importante oppose l'usage d'EV clefs-en-main à la construction de mondes virtuels par les apprenants eux-mêmes (Mellet d'Huart, Richard, & Follut, 2001; Youngblut, 1998). Les EV clefs-en-main sont utilisés dans la majorité des cas en mode mono-utilisateur, ils intègrent rarement une possibilité de coopération entre apprenants, et enfin ces EV relèvent d'une technologie immersive pour les trois quarts (Youngblut, 1998). Beaucoup moins développée, l'activité de construction de mondes virtuels est

réalisée avec des systèmes pour moitié immersifs, et pour moitié de type station de travail ; ce deuxième cadre d'usage didactique donne généralement lieu à une forte activité de collaboration entre apprenants.

Un grand nombre de systèmes proposés relèvent d'une approche technologique où prédomine la recherche du meilleur degré de photoréalisme dans les scènes. Ce type d'approche souffre actuellement de plusieurs problèmes (Burkhardt, Lourdeaux, & Fuchs, 1999). Premièrement, même si cela n'est pas toujours explicite, ce type d'approche pose comme postulat le monde réel comme terrain le plus efficace pour l'apprentissage, la technologie visant de fait à en rendre l'accès possible à un coût moindre. Or la mise en situation réelle, comme la recherche d'une simulation très réaliste, sont efficaces et pertinentes si l'utilisateur connaît déjà bien la tâche et son contexte. Si le principe de la "réalité" perceptive comme modèle à recréer s'avère justifié pour des outils visant l'évaluation ou l'automatisation de certains gestes professionnels (par la répétition, par la recréation de situations rares ou difficiles d'accès), il ne peut pas l'être de façon aussi directe pour un outil utilisable à des étapes précédentes de la formation professionnelle. La formation s'appuie en effet en grande partie sur la médiation de situations éloignées du réel (modifiées, stéréotypées, abstraites, simplifiées, falsifiées ...) qui sont choisies en fonction du niveau de l'élève, pour atteindre un objectif de formation, et dans le cadre d'une méthode pédagogique. Il n'est donc pas nécessaire de reproduire le plus fidèlement possible la réalité, il est préférable de définir le niveau optimum de fidélité nécessaire à l'apprentissage en Réalité Virtuelle et à son transfert vers le monde réel. La fidélité doit être de ce fait adaptée suivant les besoins et le niveau de l'apprenant, en fonction de l'objectif du formateur (Lourdeaux, Burkhardt, Bernard, & Fuchs, à paraître).

Un deuxième problème réside dans le risque qu'il y a à privilégier la dimension esthétique plus que pédagogique dans les dialogues avec le système, voire la prédominance d'une dimension exclusivement ludique.

Enfin, les limites actuelles de la technologie, les faiblesses dans la démarche de conception, comme les défauts d'utilisabilité et la lourdeur des applications résultantes ne sont pas à négliger en tant que sources de problèmes potentiels, à la fois pour les aspects de transfert entre situations virtuelles et le monde réel, et à la fois pour les aspects d'assistance à l'utilisateur dans le but d'éviter que des difficultés d'utilisation n'induisent une surcharge cognitive néfaste pour l'apprentissage.

Intérêts pour la formation

L'intérêt potentiel des EV pour la formation est peu traité de façon systématique à travers la littérature. Les potentialités évoquées ressemblent en fait plus à un catalogue de cas rassemblés de manière opportune qu'à des lignes de recherches claires fondées sur une approche théorique et pratique constituée.

De notre point de vue, les intérêts liés à l'usage de tels systèmes peuvent être regroupés dans trois niveaux principaux. Un premier niveau concerne les possibilités, non spécifiques aux EV, liées à l'utilisation des technologies informatiques à des fins éducatives. Sauf exception, il s'agit d'un niveau relativement peu implanté dans les EV de formation, bien que largement documenté dans la littérature sur les technologies éducatives (voir e.g. Joab & Gouardères, 1999) ; cela rejoint le constat sur le peu d'échanges entre les travaux de l'informatique pédagogique (e.g. les tuteurs intelligents) et la conception d'EV. Sans chercher à être exhaustif, on peut noter :

- l'individualisation, la programmation systématique et l'assistance contextuelle de la formation, par exemple en termes de contenu et d'itinéraire ;

- l'enregistrement automatique des données concernant les utilisateurs, par exemple pour gérer le suivi des apprenants ;
- le re-jeu des sessions d'interactions didactiques, par exemple en vue d'analyser les difficultés et les stratégies, d'expliquer les erreurs, etc. ;
- la réversibilité des actions, c'est à dire la possibilité de revenir aux étapes et aux états précédents de l'interaction didactique ; par exemple pour remettre en cause une stratégie et examiner l'impact d'une nouvelle stratégie sur les états du système ;
- le gel de situations, c'est-à-dire la possibilité de figer les états et la dynamique d'une situation problème à un moment donné, par exemple pour poser des questions ou recevoir une explication avant de reprendre le cours de la session.

Un deuxième niveau correspond aux aspects d'utilité généralement associés au recours à la simulation :

- Réaliser des tâches critiques sans danger pour soi ou autrui.
- Faire des erreurs et observer leurs conséquences sans remettre en cause la sécurité, les erreurs étant considérées comme formatrices.
- Utiliser et concevoir différentes configurations de l'environnement, e.g. terrains, conditions climatiques.
- Modéliser des terrains réels difficiles d'accès.
- Définir des scénarios/conditions rares ou impossibles à reproduire sans conséquence dans la réalité
- S'affranchir des contraintes de terrains en exploitation réelle.
- Utiliser le même équipement pour d'autres formations, voire d'autres usages (conception, analyse de l'activité, évaluation, etc.).

Un troisième niveau regroupe les intérêts plus spécifiquement liés à l'impact des environnements virtuels sur l'apprentissage. Faute de données et d'études, ces intérêts traduisent souvent plus des hypothèses que des résultats validés empiriquement. Parmi les intérêts possibles, on peut mentionner :

- la motivation à apprendre, notamment du fait des aspects ludiques et attrayants associés à la réalité virtuelle et à son usage dans le grand public.
- le plus grand réalisme, comme moyen d'approcher le réel sans risque, à moindre coût, de façon plus flexible et plus efficace en multipliant les " terrains d'apprentissages " numériques ;
- l'immersion au moyen de rétroactions simultanées sur les modalités visuelles, auditives et haptiques, comme agent catalyseur de l'acte d'apprentissage ;
- l'usage de modes d'interactions impossibles dans le monde physique, comme moyen d'approcher différemment l'apprentissage ; cet intérêt peut se lire selon le plan de la motivation (l'inédit, l'impossible, etc.) ou de l'accès à des formes d'interactions mieux adaptées à certaines formes de questionnement didactique (examiner une molécule à l'échelle de cette molécule, etc.).
- des perspectives multiples et des cadres de référence, en permettant une grande variété de points de vue et de stratégies au cours de l'interaction avec un monde virtuel ;
- l'information visuelle présentée en trois dimensions, comme procurant d'une part une dimension supplémentaire pour structurer l'information comparativement aux

écrans en deux dimensions, et d'autre part comme facilitant la présentation d'une plus grande quantité d'information ;

- l'adaptation statique et/ou dynamique du niveau de fidélité des environnements et des informations présentées (Lourdeaux et al., à paraître).
- La flexibilité et la limitation des contraintes d'espace par comparaison à un simulateur physique / maquette matérielle à l'échelle 1.

III.2.2 Quelques dimensions et aspects de la conception d'EV de formation

Apprentissage et rôle de l'apprenant en EV

Les modèles de l'apprentissage sous-jacents à la conception d'un EV pour la formation dépendent probablement en partie du domaine d'application. Quatre grandes classes transparaissent néanmoins :

- l'apprentissage correspond à la **simple exposition** à un contenu, un lieu, une information ; en pratique, cette posture esquivait le problème de l'apprentissage en focalisant la conception sur les caractéristiques des scènes à présenter, et sur les meilleurs moyens de naviguer à l'intérieur de ces scènes.
- l'apprentissage relève de la **répétition des situations de pratique** ; il est alors surtout important d'avoir un EV réaliste (Mellet d'Huart, 2001b). Dans le domaine médical, par exemple, l'objectif est la formation à une seule (ou à un ensemble restreint de) de compétences à l'intérieur d'une simulation très réaliste et anatomiquement correcte (Shawver, Sobel, Prasad, & Tapia, 2000). Le réalisme doit être entendu ici au sens de fidélité psychologique.
- l'apprentissage se fait par **imitation de l'expert** ; il est alors surtout important de présenter des démonstrations d'opérateurs expérimentés, d'une part au moyen d'agents virtuels qui peuvent démontrer à la demande (Johnson, Rickel, Stiles, & Muro, 1999), et d'autre part de multiplier les points de vue proposés à l'apprenant, notamment lui permettre de faire « avec le point de vue de l'expert » (Johnson, Moher, Ohlsson, & Leigh, 2001; Mellet d'Huart, 2001b).
- l'apprentissage se fait par **observation en temps réel des conséquences de ses propres actions** sur les paramètres de réussite à la tâche, afin d'atteindre progressivement un mode opératoire adapté ; il est surtout important d'offrir des fonctions de visualisation liant les actions de l'apprenant à la tâche (au sens large) en cours de réalisation (Mellet d'Huart, 2001b). La fourniture d'une information efficace de retour sur les conséquences des actions engagées constitue un principe également appliqué pour la formation aux situations de crises dans les domaines médicaux et militaires (Shawver et al., 2000).

Liés à ces modèles plus ou moins implicites de l'apprentissage, trois approches nous semblent coexister en ce qui concerne la vision du rôle et des tâches à prescrire à l'apprenant :

- rôle **d'observateur**, caractérisé par une tâche non structurée et non finalisée (simple « promenade ») avec un mode d'interaction/navigation minimaliste. Ce type de positionnement de l'utilisateur en formation vis à vis de l'EV correspondait à plus du tiers des applications éducatives évaluées en 1998 (Youngblut, 1998).
- rôle **d'acteur** impliquant des interactions et réactions, voire l'endossement d'un rôle et la confrontation à diverses entités virtuelles (tuteurs, autres apprenants, compagnon, etc.).
- rôle **d'expérimentateur** menant l'investigation d'une question en formulant et

évaluant des hypothèses au moyen de l'observation, de la simulation de processus ou de l'expérimentation. Cette approche regroupe des EV utilisant des supports pédagogiques variés (Youngblut, 1998) : matériel textuel extérieurs à l'EV comme des textes et des liens hypertextes, consignes prescrivant les objets à examiner associée à des courtes questions auxquelles répondre, paramètres manipulables pour visualiser leur impact, etc.

Statut de l'erreur

Le statut de l'erreur des apprenants est une question peu traitée du point de vue des EV actuels. Dans la majorité des applications à la formation médicale par exemple, les erreurs ou les variations dans la procédure prévue de la part de l'apprenant ont pour conséquence l'arrêt et/ou l'intervention d'un tuteur humain ou artificiel (Shawver et al., 2000).

Les travaux de Lourdeaux (Lourdeaux, 2001 ; Lourdeaux et al., à paraître) soulignent l'importance de distinguer le type d'erreurs suivant son origine, notamment de façon à adopter l'assistance et/ou la stratégie pédagogique appropriée. Il est par exemple utile de distinguer les erreurs qui peuvent être engendrées par des défauts d'utilisabilité de l'interface, des erreurs qui peuvent provenir d'une connaissance lacunaire, de la mise en œuvre d'une règle inadéquate ou d'un automatisme mal maîtrisé.

Il en découle deux problèmes pourtant peu étudiés (mais voir e.g. Lourdeaux, 2001), qui sont, d'une part, l'intégration d'un modèle de l'apprenant et d'une représentation de la tâche pour pouvoir diagnostiquer l'erreur¹³ de façon efficace et, d'autre part, la formalisation et le choix des stratégies pédagogiques en réponse à l'erreur.

Couplage avec d'autres outils pour la formation

Un EV peut être enrichi par des séquences vidéo ou être complété par des séquences audio par l'activation d'un hyperlien au sein même de l'environnement virtuel (Mellet d'Huart, 2001a). Par exemple, le projet VR-CSSE (Hörtner, Maresh, Lindenger, Pomberger, & Pinger, 2001) inclut, dans le mode « training », des explications audiophoniques des composants de la centrale, des étapes de la production dans la chaîne, etc, ainsi que « des vidéo d'experts » illustrant et expliquant les phases de la production. Les projets développés récemment à EDF exploitent également ce type d'enrichissement.

Il s'agit là d'une voie à exploiter ainsi que, d'une façon générale, les travaux de conception et d'évaluation dans d'autres champs de la technologie éducative.

Dimensions supplémentaires pour la conception d'un EV orienté-formation

Mellet d'Huart et al. (2001) organisent une typologie des EV pour la formation en fonction de dimensions ayant un impact sur la structure ou les fonctions des systèmes ; celle-ci recoupe partiellement certaines des dimensions discutées dans les paragraphes précédents. Les dimensions suivantes, elles mêmes décomposables, contribuent également à préciser le type d'EV :

- **fidélité par rapport au réel** ; plusieurs niveaux sont distingués, depuis l'EV présentant un environnement imaginaire, en passant par la reproduction du réel, la modification de certaines dimensions de la structure du réel (échelle de temps,

¹³ Cela renvoie en partie à un autre problème récurrent qui est la détection d'intention, voir p 38 .

échelle d'espace etc.), voire l'enrichissement du réel (perception augmentée, réification, information supplémentaire sous forme de diagramme, etc.).

- **types d'entités virtuelles présentes** ; les auteurs distinguent les systèmes sans aucune entité virtuelle, ceux présentant un ou plusieurs avatars (i.e. représentation symbolique de l'utilisateur), des entités virtuelles "habitantes", et enfin les agents intelligents susceptible d'offrir des fonctions d'assistance à l'activité et pédagogiques. L'adaptation de fonctions de type tuteur intelligent est toutefois encore peu réalisée dans le domaine de la réalité virtuelle, à l'exception de quelques rares travaux (e.g. Johnson et al., 1999; Lourdeaux et al., à paraître).
- **degré de contrôle de l'apprenant sur l'EV**; les EV préconçus, pour lesquels la marge de contrôle va de la passivité à la navigation, s'opposent aux simulations avec manipulation interactive de certains paramètres par l'apprenant (e.g. masse des étoiles, force de gravité, taux d'hygrométrie), à la création de nouvelles entités (nouveaux objets, nouveaux habitants etc.), et enfin au développement intégral d'un monde virtuel par un ou plusieurs apprenants (e.g. Barab, Hay, Barnett, & Squire, 2001).
- **degré de coopération** à l'intérieur de l'EV ; la majorité des EV sont actuellement pensés mono-utilisateurs (Youngblut, 1998). Mellet d'Huart et al. (2001) distinguent également les systèmes mono-utilisateur avec coopération possible avec des entités virtuelles, ainsi que les environnements multi-utilisateurs intégrant éventuellement aussi des entités virtuelles.
- **fonctionnalités centrées-apprentissage** ; parmi les niveaux de fonctions implantées, on peut distinguer l'exercice et la pratique de modes opératoires, les fonctions d'évaluation et de connaissance des résultats de la pratique par rapport à des valeurs standards, et enfin les fonctions pédagogiques évoluées associées à des hypothèses sur l'apprentissage.

III.2.3 Une revue des données empiriques

Bien que le potentiel de la Réalité Virtuelle soit largement reconnu pour la formation professionnelle (Adams & Lang, 1995; Stytz et al., 1997) et l'éducation (Youngblut, 1998), le peu d'études basées sur l'expérimentation concluent en général à une absence de différence notable avec d'autres modes d'apprentissage équivalents. Par contre le facteur d'interactivité apparaît comme un facteur essentiel pour favoriser l'apprentissage (Youngblut, 1998).

Cette absence de résultats probants sur le plan de l'apprentissage s'explique en partie par le fait que plusieurs aspects sensibles pour ce type de projets sont sous-estimés jusqu'à présent (Burkhardt et al., 1999).

- la profusion des usages expliquerait le caractère mal défini des notions d'immersion ou de présence considérées comme caractérisant l'expérience dans un Environnement Virtuel (Caird, 1996), en même temps qu'une faiblesse tant méthodologique que théorique en ce qui concerne le fonctionnement cognitif des utilisateurs.
- la recherche en Réalité Virtuelle a eu essentiellement pour finalité de concevoir des systèmes et des interfaces utilisateurs reconstruisant une stimulation isomorphe à celle du monde réel, mais par le biais d'un ensemble de techniques informatiques couvrant une ou plusieurs modalités sensorielles. Or pour la formation, il n'est pas nécessaire de reproduire le plus fidèlement possible la réalité, il est préférable de définir le niveau optimum de fidélité nécessaire à l'apprentissage en Réalité Virtuelle et à son transfert vers le monde réel. La fidélité doit pouvoir être de ce fait adaptée suivant les besoins et le niveau de l'apprenant, en fonction de l'objectif du formateur

(Lourdeaux et al., à paraître).

- le manque d'usage et de précédents, ce qui a pour effet de minimiser l'utilité des EV dans la mesure où les fonctionnalités de tels systèmes sont encore imparfaitement cernées
- l'ignorance des connaissances déjà acquises pour des technologies proches comme les simulateurs, dans le domaine de la conception d'IHM (Interface Humain-Machine), de l'ergonomie des logiciels interactifs, etc.
- le manque de démarche de conception réellement centrée utilisateur (Frejus et al., 1997). Outre la démarche, un modèle explicite précis de la tâche et de l'utilisateur semblent souvent absents, remplacés par un modèle métrique de la réalité à reconstruire virtuellement.
- les défauts d'utilisabilité des systèmes du fait qu'ils s'appuient sur des techniques encore peu matures. Dans le cadre d'un environnement pour la formation, il faut porter une attention particulière sur l'impact de ce phénomène, à la fois pour les aspects de transfert entre situations virtuelles et le monde réel, et à la fois pour les aspects d'assistance à l'utilisateur pour éviter que des difficultés d'utilisation n'induisent une surcharge cognitive néfaste pour l'apprentissage.

L'apprentissage en EV semble donc possible, mais les résultats expérimentaux et les procédures mises en œuvre en rendent la lecture difficile. En outre, il est nécessaire d'entreprendre des recherches pour déterminer comment améliorer le transfert d'apprentissage à travers les EV de formation (Stanney, Mourant, & Kennedy, 1998). Cela passe notamment par la détermination des tâches les plus appropriées à ce type d'outil (Stanney et al., 1998).

La suite de cette partie présente une synthèse de données de la littérature sur l'évaluation des EV dans le domaine de la formation. Deux grandes directions d'analyse complémentaires cohabitent dans ces travaux empiriques : d'une part chercher à évaluer l'apprentissage ou le transfert à une situation réelle associés à l'utilisation de la technologie de la réalité virtuelle ; d'autre part évaluer quelques unes des dimensions d'utilisabilité de ces systèmes. Les hypothèses évoquées dans les parties précédentes sont discutées lorsque des données sont disponibles.

Réalisme, photo-réalisme

La recherche du meilleur réalisme reste un objectif/argument pour concevoir des EV, même si cette recherche de réalisme ne traduit pas toujours une hypothèse très claire en termes d'effet sur l'apprentissage et le succès dans la formation. De fait, le réalisme – dans un sens très naïf - est souvent une demande spontanée des utilisateurs, lorsque il leur est demandé de s'exprimer sur les améliorations qu'ils souhaiteraient pour un EV. Il s'agit là de critères qui sont probablement plus d'ordre esthétique, voire par comparaison avec les références que sont les jeux vidéo ; en outre, le terme de "réalisme" est lui même compris dans des sens parfois très différents par les utilisateurs eux-mêmes¹⁴.

Cette orientation pro-réalisme constitue la donnée initiale majeure de nombreux cahiers des charges d'EV pour la formation (voir e.g. Syseca, 1998a), y compris parfois en ergonomie (voir e.g. Ellis et al., 1997). Les spécifications du projet VR-CCSE (Virtual Reality – Continuous Casting Simulator Environment, Hörtnner et al., 2001) mentionnent

¹⁴ Dans le cadre du projet SOFI, l'évaluation du réalisme sur une échelle donne ainsi des résultats peu utilisables dans la mesure où les sujets faisaient explicitement référence à des dimensions très différentes.

par exemple que l'environnement doit engendrer "une impression qui approche le réel : (...) en plus de la dimension visuelle réaliste, la dimension accoustique a un rôle aussi important." Toutefois, dans une évaluation informelle des premières utilisations du système, les mêmes auteurs concluent que l'un des intérêts principaux est de pouvoir visualiser des détails et des processus qui sont habituellement non accessibles dans une centrale réelle. De même, l'exemple d'EV de formation développé dans Ellis, Begaud et Wenzel (Ellis et al., 1997) a la particularité de ne pas être un environnement réaliste.

Les rares études ne montrent pas de supériorité évidente en termes d'apprentissage. Par exemple pour une tâche de manipulation, Kozak et al.(1993), cités par Stanney et al. (1998) ne trouvent pas de bénéfice significatif en terme de transfert d'apprentissage avec un entraînement en environnement virtuel, par comparaison avec l'entraînement en l'environnement réel, et l'absence d'entraînement. Ils expliquent cela par le fait que l'ajout d'indices de profondeur stéréoscopique n'améliore pas significativement la performance, parce que la tâche est simple et que les sujets peuvent s'appuyer sur des connaissances de tous les jours, accumulées dans des tâches analogues.

La quête du réalisme graphique implique de surcroît des techniques de rendu graphique dont le coût est fort du point de vue des ressources machine. Drouin et col. (1999) se sont posé la question de savoir jusqu'à quel point il était possible de dégrader une image tout en garantissant néanmoins qu'elle reste significative, utilisable – sinon esthétique. Les résultats de cette étude suggèrent d'analyser avec précision les indices que les opérateurs professionnels extraient : d'une part, il serait ainsi possible de restreindre l'affichage le plus précis aux seuls indices effectivement utilisés, éventuellement en supprimant l'information non pertinente pour la tâche ; d'autre part, l'usage d'algorithmes d'affichage appropriés aux différents besoins de précisions devraient permettre de diminuer le poids du calcul graphique dans les applications réelles. L'étude de Drouin et col. (1999) compare en parallèle le comportement et les performances de trois groupes de sujets, dans différentes tâches plus ou moins écologiques : des opérateurs du domaine, des concepteurs spécialisés dans le domaine de la réalité virtuelle, et enfin des sujets dit "naïfs". Les résultats suggèrent une sensibilité différente des trois groupes à la qualité de l'image : notamment, les concepteurs du domaine de la réalité virtuelle ont des critères plus élevés et moins sensibles aux particularités métier que les opérateurs du domaine.

Le réalisme simplement visuel ne semble donc pas un élément systématique à rechercher, sinon lorsqu'il est pertinent pour la tâche. Il peut probablement avoir un intérêt lorsqu'il est intégré dans une réflexion sur l'apprentissage, avec d'autres caractéristiques de la situation didactique. La discussion sur la fidélité psychologique de la transposition didactique (cf. notion de réalisme, p° 20) nous semble la voie d'étude la plus prometteuse pour opérationnaliser et valider l'efficacité de cette dimension du réalisme.

Motivation liée à l'usage de la RV

Le pouvoir de motivation des EV constitue l'un des premiers aspects soulignés dans les évaluations généralement informelles menées à propos d'EV pour la formation (e.g. Byrne, 1996). Il est dit qu'en général, les apprenants sont très motivés par l'interaction avec un EV. Adams et Lang (1995) expliquent par exemple ainsi la supériorité de l'apprentissage avec, un EV immersif. Pour Brown et al (1996), la RV est capable de capter l'attention des étudiants et de favoriser leur implication active dans leur propre éducation ; il s'agit de rompre avec ce que certains auteurs décrivent comme "l'âge de la télévision" qui aurait engendré des étudiants passifs, dés-impliqués et ayant une faible capacité d'attention. Le rôle effectif de la motivation n'est toutefois pas clairement établi sur le long terme.

Pédagogie active, interactivité et EV

Utilisés comme support de formation [la réalité virtuelle, les simulateurs] rendent l'apprenant plus actif que dans le cadre de pédagogies classiques (Gaillard, 1997). Dans un contexte d'enseignement scolaire, l'utilisation d'environnements d'apprentissage virtuels (Brown et al., 1996) devrait également encourager l'apprentissage auto-dirigé (voir par exemple les résultats de Cromby & et al, 1996), notamment à travers le recours au jeu. Les EV permettent ainsi aux étudiants de jouer dans de nombreux environnements, de laisser leur imagination courir à profusion hors d'environnements tout faits, ou de créer leur propre environnement et personnages qu'ils peuvent « endosser ».

L'interactivité a un effet positif sur l'apprentissage en EV (Youngblut, 1998). Toutefois l'effet positif de l'interactivité sur l'apprentissage ou la performance n'est pas systématique (Stanney et al., 1998) ; à partir de l'analyse de plusieurs travaux, ces auteurs concluent que l'interactivité s'accompagne d'une augmentation de la charge de travail de l'utilisateur, laquelle peu avoir pour effet d'empêcher l'apprentissage et l'amélioration de la performance.

La notion d'*interactivité* nécessite d'être précisée, car elle peut revêtir des sens très différents depuis le déclenchement de l'étape suivante dans l'exposition d'une consigne jusqu'au contrôle par l'apprenant des paramètres d'une simulation pour en comprendre les règles de fonctionnement, ou encore l'établissement de dialogues avec d'autres entités virtuelles. Dans une analyse restreinte à l'usage de l'animation dans l'apprentissage, Bétrancourt et Tversky (2000) suggèrent que l'interactivité¹⁵ liée à la navigation dans l'outil ne semblerait pas améliorer l'efficacité ; l'interactivité de l'apprenant avec les variables de la simulation sous-jacente à l'animation¹⁶ serait à l'inverse favorable pour l'apprentissage. De façon similaire, Lourdeaux et col (à paraître) distinguent deux niveaux dans l'interactivité offerte à l'apprenant dans un EV : les interactions liées à l'utilisation des dispositifs propres à la technologie du virtuel, et les interactions associées à l'apprentissage.

Ces deux notions d'interactivité et de pédagogie active devraient être plus particulièrement précisées et évaluées au niveau de leur influence sur l'apprentissage.

Sémantique "naturelle", dimension intuitive

La réalité virtuelle aurait une sémantique naturelle (Brown et al., 1996) : les propriétés des objets virtuels peuvent être découvertes par l'interaction directe avec eux. Cette méthode d'enseignement permettrait de contourner l'apprentissage d'un système abstraits de symboles qui serait ensuite utilisé pour décrire le monde réel, et d'aller directement vers une éducation par connaissance directe. Toutefois, cette hypothèse nécessite de plus forts arguments empiriques, d'autant que les rares données sur l'usage d'interfaces de manipulation directes sont peu convaincantes pour l'apprentissage (cf. p 11).

La recherche d'une interaction plus intuitive et plus spontanée est un objectif affiché par de nombreux promoteurs des technologies de la réalité virtuelle (e.g. Cadoz, 1994b ; Kabbash & Buxton, 1995; Leibe et al., 2000) ; en effet, la vocation première de la Réalité virtuelle est [de chercher] à rester proche des mécanismes naturels d'appréhension du monde (Mellet d'Huart, 2001a). Ainsi pour interagir avec un environnement virtuel, les utilisateurs se basent sur leurs connaissances du monde.

¹⁵ "Interactivity in instruction"

¹⁶ "Interactivity in practice"

Pourtant, le développement en est encore clairement à ses débuts, les systèmes étant peu matures (Burkhardt et al., 1999; Willans & Harrison, 2001).

De nombreuses activités apparaissent ainsi moins simples et moins naturelles en EV : par exemple, l'intelligibilité d'un espace en trois dimensions n'est pas immédiate (Hinckley, Paush, Goble, & Kassel, 1994, p 214). De même, il semble nécessaire de trouver des périphériques et des dialogues plus intuitifs, alors même que d'apprentissage apparaît efficace (Adams & Lang, 1995). Nous pensons que les réponses à apporter ne sont pas uniquement d'ordre technique, mais également d'ordre méthodologique afin d'intégrer les dimensions de la perception et de la cognition des utilisateurs dans la démarche de conception.

Présence, performance et apprentissage

Une hypothèse courante est que l'accroissement de la dimension de présence¹⁷ a un effet positif sur la performance à une tâche (e.g. Zeltzer, 1992). Même si elle est très largement reprise dans la littérature, il y a peu de travaux et de résultats la concernant (Stanney et al., 1998). La dimension de présence est associée également à l'amélioration de l'apprentissage. Par exemple, Bystrom & Barfield, (1999, p 436) supposent qu'un fort niveau de présence doit permettre un meilleur transfert des apprentissages en EV vers le monde réel. Toutefois, dans la mise à l'épreuve empirique de cette hypothèse, les auteurs observent essentiellement un effet favorable de la réalisation des tâches en binôme, plutôt qu'individuellement. On notera l'absence de mise en relation entre le niveau de présence mesuré et les performances obtenues dans l'étude de Bystrom & Barfield, (1999).

Adams et Lang (1995) présentent (de façon succincte) parmi les premières expériences de l'utilisation de la Réalité Virtuelle dans une formation avancée dans l'industrie. Cette expérience s'intègre dans une formation de trois jours destinée aux associés de Motorola, ayant pour objectif d'apprendre à gérer des lignes d'assemblage robotisées. Les résultats d'une étude préliminaire sont relatés. Au cours de la session d'octobre 1994, 21 sujets en formation sont divisés en trois groupes :

- le groupe contrôle (C) suit la formation traditionnelle
- le groupe EVE interagit avec l'Environnement Virtuel au moyen d'une souris et d'une console d'ordinateur
- le groupe EVI utilise l'EV selon un mode immersif avec un casque et un capteur.

Le même formateur, et le même programme d'instruction est utilisé pour chacun des groupes. Les deux groupes EVE et EVI reçoivent en outre 20 minutes d'instructions sur comment naviguer à travers le modèle virtuel. A l'issue de la formation, on demande aux stagiaires de mettre en marche, faire tourner puis arrêter une chaîne de production réelle du laboratoire. Les erreurs de chaque sujet sont relevées chaque tâche. Les résultats descriptifs montrent que le groupe en condition EV immersif (EVI) fait systématiquement beaucoup moins d'erreurs que les autres groupes Contrôle et EV écran (EVE) qui ont eux des résultats sensiblement équivalents. Selon les tâches, le nombre d'erreurs diffère également: le maximum d'erreur étant observé dans la tâche Setup, et le minimum dans la tâche Running (voir Tableau 2, $\chi^2(6) = 13.23$, $p < .05$, V de Cramer = .357). La différence la plus importante est pour la première tâche (Setup) où une seule erreur est observée dans la condition EVI contre 13 et 14 respectivement pour les conditions Contrôle et EVE. A l'inverse de ce qui est observé dans les autres

¹⁷ Nous avons discuté précédemment les problèmes théoriques associés à cette dimension (voir p 19).

tâches, le groupe EVI fait une erreur contre aucune pour les groupes Contrôle et EVE. Les auteurs de l'article suggèrent comme explication possible que les stagiaires du groupe immergé (EVI) pratiqueraient plus que les autres groupes : le formateur a en effet relevé de façon très informelle que chez ce groupe en particulier, les stagiaires ne prennent même pas les pauses prévues entre les différentes phases de la formation.

Tâches	Contrôle (C)	EV écran (EVE)	EV immersif (EVI)
Setup	13	14	1
Startup	5	6	1
Running	0	0	1
Shutdown	6	6	1

Tableau 2. Nombre d'erreurs suivant la modalité de formation et la tâche (d'après Adams & Lang, 1995).

Coopération au sein de l'EV

Un hypothèse commune à de nombreux auteurs est que la coopération en EV doit faciliter l'apprentissage en permettant aux étudiants/stagiaires de travailler ensemble pour comprendre les problèmes et construire des modèles mentaux précis des domaines de connaissances.

Il existe peu de travaux qui évaluent cette hypothèse de façon directe. Bystrom & Barfield, (1999) utilisent une tâche d'apprentissage spatial, consistant à naviguer dans un espace 3D et à indiquer sur un schéma papier de l'environnement les modifications de localisation d'objets. Les auteurs étudient notamment l'effet de la coopération avec un pair et du contrôle actif vs passivité de l'apprenant quant au mouvement dans l'EV. En terme d'apprentissage (i.e. mesure ici par la performance à la tâche d'identification des modifications de localisation entre chaque essais), la collaboration entraîne le meilleur résultat, les performances étant systématiquement moins bonnes en condition de passation seul ; l'effet du contrôle du mouvement se traduit essentiellement par une performance moindre chez les sujets seuls et passifs.

Immersion, multi-sensorialité

L'immersion est souvent mentionnée comme une propriété nécessaire de l'environnement, notamment en ce qui concerne l'apprentissage (e.g. Malik, Martin, Peci, & Vivian, 2001). L'hypothèse habituelle associant immersion et performance en terme d'apprentissage et de transfert est que l'immersion dans un environnement **similaire** à celui de la future tâche doit s'accompagner d'un meilleur apprentissage : la connaissance acquise serait ainsi structurée d'une façon proche de la structure requise par la tâche (Stanney et al., 1998).

Toutefois, le bénéfice de l'immersion – le terme doit être pris avec précaution, nous l'avons déjà dit ailleurs (voir la discussion p° 19)- n'a pas réellement de confirmation empirique (Stanney et al., 1998). Quelques études expérimentales ont cherché à évaluer l'effet de systèmes immersifs (généralement constitué de systèmes de visualisation en 3D, souvent au moyen d'un casque ou de lunettes) en termes d'efficacité pour l'apprentissage, par comparaison avec d'autres environnements non immersifs (généralement un environnement de type micro-ordinateur présentant des images en 2 dimensions, voire des modes plus traditionnels d'enseignement). Par exemple, Byrne (1996) a étudié l'effet de deux facteurs, l'immersion et l'interactivité, sur

l'apprentissage dans le domaine de la physique moléculaire; l'auteur observe que seul le facteur interactivité du matériel a un effet positif. Youngblut (1998) relate aussi deux autres études qui concluent à l'absence d'effet positif de l'immersion sur l'apprentissage, la première dans le domaine de la résolution de problèmes liés au raisonnement dans l'espace (Gay, 1994), et la seconde dans le domaine de la biologie cellulaire (Merickel, 1994). A l'inverse, Adams et Lang (1995) trouvent un effet bénéfique de la condition immersive. Plusieurs auteurs soulignent que l'immersion dans l'EV peut avoir pour effet de distraire l'attention des apprenants du contenu, au moins dans les premières immersions (Gay, 1994). Les derniers projets d'EV de formation développés en France font usage d'une technologie généralement peu immersive (e.g. EDF, SOFI, mais voir le Démineur et la thèse de Thérèse Pasquier). Youngblut (1998) insistait d'ailleurs sur le fait qu'en pratique, les EVs de type « Desktop » sont mieux adaptés pour un usage large dans la formation et l'apprentissage, que les technologies immersives. Pour aller plus loin, il semblerait intéressant de distinguer dans les études empiriques plusieurs facteurs confondus dans la notion d'immersion.

La notion d'immersion, telle que nous l'avons définie (cf. p° 19) c'est à dire comme une mesure de la corrélation et de l'ampleur de l'information avec laquelle l'utilisateur est en interaction, est une première approche. Une autre approche parallèle (les liens sont à approfondir avec la précédente), doit étudier l'effet de l'usage combiné de différentes configurations de modalités sensorielles et d'interaction motrices proposées à l'utilisateur, ainsi que l'influence de la façon dont l'information est présentée et répartie entre ces modalités considérées. La dimension sensorielle est centrale, au moins idéalement dans les définitions de l'immersion dans la réalité virtuelle. Les sens peuvent être définis comme « chacune des fonctions psychophysiologiques par lesquelles un être humain ou animal reçoit des informations sur certains éléments du milieu extérieur de nature physique (vue, audition, sensibilité à la pesanteur, toucher) ou chimique (goût, odorat)¹⁸.

Des travaux ont ainsi investigués l'effet de l'ajout d'informations d'autres modalités sensorielles à l'EV, en plus de l'information délivrée visuellement. Par exemple, l'ajout d'une information haptique supplémentaire dans l'EV Newton World (Dede et al., 1996) s'accompagne d'une meilleure compréhension des notions de cinématique comme l'accélération et la vitesse, mais d'une capacité moindre à prédire les comportements de mobiles, par comparaison aux groupes ayant l'information visuelle seule ou enrichie du son. Une étude portant sur un EV similaire (Maxwell World Dede et al., 1996) appliqué aux phénomènes électriques suggère que la présentation d'information sur plusieurs modalités sensorielles permet d'améliorer la compréhension de la distribution des forces dans un champ électrique. Pour les auteurs, l'information délivrée par les autres modalités haptiques et sonores pourrait avoir guidé l'attention des apprenants vers les comportements et relations importants de façon plus efficace que la seule information visuelle. On notera que l'ajout d'information multisensorielle semble également avoir un rôle dans l'utilisabilité et l'intelligibilité de l'EV¹⁹; les mêmes auteurs observent ainsi que les utilisateurs jugent dans ce cas l'environnement plus simple à utiliser, et que le référentiel égocentrique est mieux compris, par comparaison avec le groupe ayant l'information visuelle seule.

La multisensorialité constitue une voie d'investigation déjà abordée à travers l'approche

¹⁸ (Bloch et al., 1991)

¹⁹ L'inévitable effet de la dimension d'utilisabilité sur l'apprentissage est à envisager, même si cela ne semble pas être le cas dans l'exemple précédent : en effet, en moyenne, les notions étaient jugées plus faciles à comprendre avec l'EV, tandis que l'utilisation en était jugée plus difficile, comparativement au système comparé.

« traditionnelle » des interfaces multimodales. Toutefois, nous défendons l'idée qu'une autre approche intéressante, à la fois en pratique, et à la fois du point de vue de la recherche, réside dans la suite des travaux portant sur la notion d'interfaces pseudo-haptiques (Lecuyer, Burkhardt, Coquillart, & Coiffet, 2001; Lecuyer et al., 2002)²⁰. Plusieurs travaux insistent sur la relation entre vision et perception haptique. On en trouve premièrement qui témoignent du fait que, d'un point de vue fonctionnel chez l'homme, le cortex visuel est impliqué dans la perception tactile chez les sujets aveugles et chez les voyants (Kerzel, 2001). Deuxièmement, on peut penser que l'information haptique est utilisée pour réaliser des tâches impliquant des processus cognitifs plus large que les seuls relatifs au contrôle du geste : cela apparaît dans des situations où il y a un apprentissage préalable comme cela est souvent le cas dans le domaine professionnel, mais également dans des situations où la tâche exploite un comportement moteur habituel, i.e. ne nécessitant pas un réel apprentissage (e.g. Schwartz, 1999). Des travaux ont ainsi mis en évidence l'existence d'informations sensorielles autres que visuelles utilisables par le sujet dans le cadre de la réalisation de tâches simple. En dehors d'un environnement virtuel, Schwartz (1999) montre par exemple qu'en l'absence de vision et d'autres indicateurs environnementaux utilisables pour estimer la distance, il semble que le seul "travail" haptique lié à la marche soit suffisant pour pouvoir estimer une distance parcourue, au moins lorsqu'elle est comprise entre 10 et 20 mètres. Dans une série d'expériences où l'auteur élimine méthodologiquement la possibilité d'user d'une métrique temporelle ou d'une stratégie cognitive de comptage pour estimer une distance parcourue en aveugle, l'auteur montre que les sujets même non habitués à marcher avec un dispositif aveuglant sont capables avec une bonne précision d'estimer la longueur parcourue ; elle montre également que la longueur du pas joue un rôle dans la perception de la distance locomotrice, dans la mesure où lorsqu'elle est artificiellement désynchronisée avec la cadence associée, elle est corrélée positivement avec l'amplitude absolue des erreurs d'estimation. Néanmoins, même en cas d'erreur, la distance estimée est en corrélation forte avec la distance réellement parcourue. Troisièmement, des travaux récents mettent l'accent sur certaines interférences apparaissant entre tâches haptiques et visuelles pour lesquelles il existe une certaine corrélation de structure. Dans une série d'expériences ayant pour objectif d'examiner, entre autres, l'hypothèse d'une interdépendance entre la mémoire visuelle à court terme et la perception haptique, Kerzel (2001) montre que l'information visuelle de vitesse est affectée par l'information haptique liée à l'exécution d'un geste de vitesse supérieure ou inférieure, pendant la période de rétention séparant la présentation du stimulus de référence et la présentation du stimulus cible. Le calcul du point d'équilibration subjective (PES) dans différentes conditions fait apparaître une déviation du point de jugement d'identité entre deux stimuli visuels, cette déviation étant de même direction que l'information haptique interférente. Ainsi, la mémoire visuelle et l'information haptique engendrée par la réalisation d'un geste apparaissent comme étant traités de façon dépendante (Kerzel, 2001; Lecuyer et al., 2001).

III.3 Ergonomie et conception d'EV pour la formation

Deux approches complémentaires apparaissent actuellement en ergonomie des Environnements Virtuels.

La première étudie les différents périphériques et environnements produits au moyen d'investigations inspirées de l'expérimentation dans les domaines de la perception et du

²⁰ Un dispositif pseudo-haptique se définit comme un système qui engendre une information haptique "augmentée" ou modifiée par l'effet d'une autre modalité (Lecuyer et al., 2001).

contrôle moteur. Souvent analytiques, effectuées en laboratoire²¹, ces études participent à la construction d'un corpus de données empiriques sur les capacités perceptives humaines et les défauts des technologies du virtuel en regard de la perception dans un environnement réel. A côté de quelques thématiques de recherches suivies (e.g. mal des simulateurs, présence, pointage et localisation spatiale), d'autres travaux nombreux de type « tests utilisateurs » revendiquent cette approche, mais souffrent d'un manque de fondement théorique, d'une valeur écologique faible, et de l'absence de répliques.

La seconde approche vise à intégrer les différentes dimensions de l'activité orientée et « située » de l'homme avec des outils pour améliorer l'ergonomie des dispositifs de réalité virtuelle. En particulier dans le domaine des EV pour la formation, des méthodologies de conception et d'évaluation centrées sur l'utilisateur et les activités de formation sont proposées (Burkhardt et al., 1999; Fréjus, 1998) et des principes fondés sur le retour d'expérience d'utilisations réelles commencent à être publiés (Fréjus, 1999; Johnson et al., 2001 ; Lourdeaux, 2001).

Fréjus(1999) analyse par exemple la situation de formation continue dans un domaine technologique, comme une situation fortement interactive caractérisée par «une interaction inégalitaire dominée par le formateur. L'objectif de cet auteur est la conception d'un outil d'aide pour une situation où un professionnel spécialiste du domaine tend à expliquer des faits ou des notions complexes à une personne ou à un collectif de personnes ayant des connaissances inégales/variables du sujet. L'auteur définit ce type d'interactions comme en grande partie constituées d'explications, et s'appuie, pour l'analyse de l'activité d'explications en situation d'apprentissage, sur les modèles linguistiques et psychologique liés à la résolution de problèmes. L'outil de RV développé dans ce contexte est analysé de façon fine dans son utilisation par les formateurs. Il en découle qu'outre sa bonne intégration dans le cours de l'animation de la formation, plusieurs éléments pratiques sont soulignés : usage d'un grand écran, sans stéréoscopie, gestion du point de vue et déclenchement des animations par le formateur (au moyen d'une souris 3D), et fort appui sur l'outil pour structurer l'interaction pédagogique.

Johnson et al. (2001) proposent une réflexion sur l'expérience de plus d'une année d'utilisation de la réalité virtuelle à l'intérieur d'une école (Johnson et al., 2001). Selon eux, la pratique pousse à distinguer 3 situations pour ce qui concerne l'usage d'un capteur de tête²² associé aux lunettes stéréoscopiques asservissant le point de vue projeté à un ou plusieurs utilisateurs (Johnson et al., 2001) :

- apprenant seul utilisant l'EV avec un grand écran; dans ce cas, l'apprenant utilise le capteur de tête ;
- un enseignant en compagnie d'un petit groupe ; l'enseignant a la tête «suivie», et doit prendre la précaution de ne pas faire de mouvements brusques du chef ;
- un groupe d'apprenants en activité autonome : pas d'utilisation du capteur de tête.

Ces projets divers, parmi les rares ayant donné lieu à évaluation à notre connaissance, conduisent au tableau suivant en ce qui concerne l'équipement et le contrôle de l'interaction avec l'EV.

²¹ Le terme de laboratoire fait ici référence au degré de réductionnisme -ou de réalisme- de la situation de conception étudiée, et non « au cadre géographique » dans lequel intervient l'étude.

²² Les auteurs envisagent comme piste de tester le mouvement de la main plutôt que celui de la tête pour contrôler la présentation d'images dans les configurations d'usage multi-utilisateur.

	Usage individuel	Formation en groupe	Travail en groupe
Equipements	Grand écran (SOFI, 2001), Pas de lunettes stéréoscopiques (SOFI, 2001).	Grand écran : visibilité pour le groupe et le formateur (Fréjus, 1999 ; Johnson et al., 2001 ; SOFI, 2001) Usage ponctuel des lunettes pour les stagiaires (Fréjus, 1999) (uniquement s'il y a nécessité de la stéréoscopie ; l'inconvénient est de cacher le visage des stagiaires ce qui est une information importante pour animer/contrôler le déroulement de la session de formation) ; Usage des lunettes formateur (Johnson et al., 2001).	Grand écran (visibilité pour le groupe) (Johnson et al., 2001). Pas de lunettes pour les stagiaires (Johnson et al., 2001).
Contrôle du mouvement	Head tracking du stagiaire, Joystick (SOFI, 2001)	Head tracking pour le formateur (Johnson et al., 2001)/ space mouse manipulée par le formateur (Fréjus, 1999)	Organisation tournante entre les stagiaires/étudiants : navigateur, preneur de notes, observateurs (Johnson et al., 2001)

Tableau 3 Configuration équipement/périphériques de contrôle utilisés en individuel, en groupe tutoré et en travail en groupe.

On retiendra que l'usage d'un grand écran facilite la communication, à la fois entre les pairs (Bobick et al., 1999), et à la fois entre l'animateur et les stagiaires (Fréjus, 1999). Cet élément apparaît comme une caractéristique structurante du déroulement d'une session de formation et de l'activité du formateur/animateur.

Le contrôle du point de vue, dans les applications multi-utilisateurs, est confié à un périphérique manuel (souris 3D, joystick etc.) plutôt que pris en charge par asservissement aux mouvements de la tête de l'un des utilisateurs ; cela permet d'une part à l'animateur du groupe de maintenir son attention sur le groupe plutôt que sur la vue affichée, et d'autre part le contrôle de l'image résultant s'accompagne de moins de mouvements brusques, et donc de risque de malaise pour les autres observateurs.

D'autres études sont néanmoins nécessaires pour approfondir et affiner les recommandations pratiques.

III.3.1 Interventions de l'ergonomie

La mise au point des environnements virtuels fait appel de plus en plus à des collaborations avec l'ergonomie et les sciences de la cognition, d'une part pour ce qui est des connaissances sur les caractéristiques de la perception (ex. vision, modèles psychophysiques), d'autre part plus récemment pour ce qui est des connaissances et de la méthodologie pour l'analyse des interactions, l'évaluation et la conception de dialogues plus simples et efficaces pour les utilisateurs. L'intérêt pour l'étude ergonomique de la cognition en environnement virtuel s'inscrit dans cette direction, comme en témoigne les sessions récurrentes consacrées à la cognition dans les dernières conférences importantes du domaine. En France, un workshop dédié à "réalité virtuelle & cognition" a récemment réuni plus d'une centaine de participants (voir Grumbach & Richard, 1999). Il reste qu'encore aujourd'hui, l'ergonomie est souvent mentionnée comme l'un des aspects critiques de la conception et de l'évaluation des systèmes de réalité virtuelle, mais la mise en œuvre d'une méthodologie ergonomique véritable semble peu généralisée. Ce dernier constat corréle avec l'évaluation souvent négative des EV sur les deux dimensions d'utilité et

d'utilisabilité traditionnelles en ergonomie informatique (e.g. Kaur, Sutcliffe, & Maiden, 1999; Willans & Harrison, 2001).

Du point de vue de l'utilité, les fonctionnalités associées aux EV actuels sont encore imparfaitement cernées du fait du manque d'usage et de précédents. De surcroît, la lourdeur des applications fait que l'on se trouve souvent avec des modes d'interactions limités de type visite, navigation ou déambulation.

Du point de vue de l'utilisabilité, les défauts proviennent pour partie du fait que les techniques sont encore peu matures. Ainsi dans de nombreux EV, la perception sensorielle est partielle, caractérisée par des incohérences entre les informations traitées par les différents systèmes récepteurs (ex. vision / oreille interne). De surcroît, les sources d'information liées à l'environnement réel de l'utilisateur se superposent, voire entrent en conflit avec l'information délivrée par le système²³. Une autre raison réside dans le fait que de nombreux travaux dans le domaine abordent l'homme sous l'angle de la perception comme un récepteur passif, et non sous l'angle de la cognition (Frejus & Drouin, 1996). De fait, bien que les environnements virtuels soient conçus pour des opérateurs humains, un constat est que la recherche technologique s'avère bien plus avancée que l'étude des aspects cognitifs (Draper et al., 1998; Verna & Grumbach, 1998a). Le caractère novateur de la Réalité Virtuelle a pu être également évoqué comme justification pour ignorer les connaissances déjà acquises sur l'utilisabilité pour des technologies proches comme les simulateurs, dans le domaine de la conception d'IHM (Interface Humain-Machine), de l'ergonomie des logiciels interactifs, etc. Enfin, dans les entreprises qui promeuvent la réalité virtuelle, l'ergonomie est encore souvent assimilée aux seuls aspects anthropométriques de la conception et de l'aménagement des postes et des systèmes de production : dimensionnement, accessibilité physique, visibilité centrale et périphérique, etc. (Syseca, 1998b). L'ergonomie cognitive est rarement considérée pour la conception des systèmes informatisés.

D'autres aspects sont impliqués dans le défaut d'ergonomie des EV. Un aspect concerne un manque de démarche de conception centrée-utilisateur (Frejus et al., 1997). Ainsi, des éléments importants pour la définition du modèle conceptuel puis pour l'implantation de tout système sont par exemple l'existence d'un modèle explicite précis de la tâche pour ce qui est des fonctionnalités, ainsi qu'un modèle explicite de l'utilisateur associé à la formalisation de son comportement à l'intérieur du système pour ce qui est de l'interface et des dialogues. Or l'un ou l'autre de ses modèles semblent souvent absents, remplacés par un modèle métrique de la réalité à reconstruire virtuellement, en faisant l'hypothèse rarement vérifiée que ce réel virtuel va faire " disparaître " l'interface. Des propositions de démarches ont été faites récemment dans divers domaines d'application (ex. Burkhardt et al., 1999; Fencott, 1999; Fuchs, Nashashibi, & Lourdeaux, 1999).

Un aspect est lié à la discipline ergonomique elle-même : les connaissances et la méthodologie nécessitent d'être enrichies et adaptées pour répondre au contexte d'intervention de la conception d'EV. Bien que les connaissances actuelles soient non négligeables en effet, de nombreux aspects du problème ne trouvent pas encore de réponse ergonomique éprouvée, notamment du fait de la jeunesse relative du domaine. Des problématiques nouvelles pour l'ergonomie doivent ainsi être approfondies : critères et dimensions de l'utilisabilité des EV ; conception et évaluation d'avatars virtuels pour représenter les utilisateurs dans l'EV ; utilisation de la souris et du clavier pour naviguer

²³ Cet aspect est impliqué en particulier dans le " mal des simulateurs " consécutifs chez certains utilisateurs à l'exposition à un monde virtuel (voir à ce sujet le numéro spécial de la revue Presence 1(3) 1992).

facilement dans un espace à trois dimensions etc.

Un dernier aspect concerne les limites contraignantes des outils des concepteurs (Burkhardt et al., 1999; Willans & Harrison, 2001). A titre d'exemple, l'architecture des systèmes focalisés sur le réalisme (essentiellement visuel) est souvent peu flexible, avec une base de scène (souvent en C++) où la gestion se fait pour l'essentiel objet par objet, de façon inerte, avec de gros problèmes dus à la structure d'héritage et aux nombreuses contraintes régissant les liens entre objets à l'intérieur d'une scène. Un autre exemple concerne les primitives d'affichage ou de dialogue disponibles qui ne sont pas toujours adaptées aux besoins qu'engendrent la gestion d'une interaction intelligente entre l'utilisateur et le système.

III.3.2 Dimensions importantes de la conception

Modèles de l'utilisateur

Pour qu'il soit bien adapté, la conception de tout EV nécessite la connaissance précise des caractéristiques de ses utilisateurs ; cette connaissance doit être ensuite formalisée, d'une part pour des besoins de communication à l'intérieur de l'équipe de conception, et d'autre part pour en déduire les contraintes et les implications pratiques sur la logique et la structure des dialogues de l'EV, ainsi que sur l'organisation de l'information au niveau des interfaces. Cette connaissance concerne plusieurs niveaux.

A un niveau général, il faut évidemment tenir compte des particularités sociologiques, culturelles, organisationnelles où s'inscrit le projet de conception d'un EV ; ces particularités peuvent jouer par exemple sur la faisabilité du projet, ou encore sur la capacité qu'aura le système à être approprié par les utilisateurs sur le terrain.

Deux autres niveaux au moins sont à considérer car ils contraignent de façon directe la compatibilité de l'EV avec ses utilisateurs. Le premier concerne les caractéristiques physiques et anthropologiques de la population particulière des utilisateurs. Il y a une grande diversité des dimensions humaines, laquelle s'oppose à l'unicité classique des matériels. Ce niveau peut s'exprimer au moyen d'un modèle tiré de l'analyse de la population cible, avec une spécificité des EV qui est que deux utilisations très différentes peuvent en être faites. L'utilisation première concerne l'adaptation à ce jeu de contraintes de l'interface physique utilisée pour un EV. Même si elle n'est pas sans lien avec la précédente, la deuxième utilisation concerne les paramètres et le niveau de fidélité du modèle logiciel des caractéristiques de l'utilisateur individuel retranscrites dans le monde virtuel. Le deuxième niveau concerne la cognition des utilisateurs, c'est à dire les processus et les raisonnements de la population d'utilisateurs dont les particularités doivent être prises en compte pour adapter les fonctions du système à ces processus. L'interaction en EV peut- doit ?- se faire en parallèle à plusieurs niveaux d'abstraction (perception, action, langage) et de régulation (automatismes, règles, connaissances). L'analyse de ces niveaux peut s'appuyer sur des modèles psychologiques suffisamment formels pour décrire précisément l'activité mentale, voire la simuler.

Dans les EV actuels, le modèle de l'utilisateur est en majorité implicite, informel voire à reconstruire de l'extérieur à partir de l'observation d'utilisateurs immergés et de leur comportement au cours de leurs interactions avec le système. Qu'il s'agisse de modélisation anthropologique ou cognitive, l'apport des travaux dans ces deux champs d'application de l'ergonomie est de fournir un cadre utile au développement des modèles utilisateur pour la conception des EV futurs.

Les données empiriques concernant l'influence des caractéristiques de l'utilisateur sur l'activité en EV sont encore parcellaires.

La détection d'intention : considérer la piste des modèles de tâches

Un problème central pour le succès des interactions avec un EV est celui de la détection d'intention de l'utilisateur (Verna & Grumbach, 1998b), soit pour l'assister dans la réalisation de sa tâche, soit pour pallier certains défauts actuels d'utilisabilité. Par exemple, le déplacement et la manipulation fine d'objets posent souvent des problèmes liés au positionnement et à l'angle d'approche ou de saisie, amenant l'utilisateur à mettre en œuvre des comportements peu efficaces, longs et s'éloignant d'une stratégie naturelle.

Lorsque l'interaction avec le système peut être ramenée à une séquence ordonnée, univoque et finie d'actions, il est possible de se restreindre à une détection locale et a-contextuelle fondée, par exemple, sur le positionnement de l'utilisateur à un moment donné, ses gestes, sa vitesse ou la direction de son mouvement.

Dans tous les autres cas, un mécanisme de détection locale est susceptible d'engendrer plus de problèmes qu'il n'en résout ; entre autres problèmes, on peut citer notamment le déclenchement intempestif d'actions ou le repositionnement de l'utilisateur à chaque occurrence de son passage à une même position de l'EV. Pour faciliter l'interprétation des actions de l'utilisateur, une piste consiste à implanter un modèle de la tâche de l'utilisateur permettant au système d'analyser l'atteinte progressive des buts et d'en opérer le suivi jusqu'à sa réalisation. L'interprétation par le système des actions de l'utilisateur se fait alors en référence à la tâche, à ses objectifs et ses contraintes, et non uniquement en fonction d'un appariement de paramètres locaux. L'apport d'un modèle de tâches auquel le système peut se référer pour comprendre les actions de l'opérateur s'établit à trois niveaux : pallier les défauts d'utilisabilité du système ; gérer la cohérence entre des systèmes distants au moyen d'une connaissance commune des objectifs de la tâche ; pour les EV de formation, implanter des modèles des stratégies de l'expert et de l'élève (il n'est pas inutile de rappeler l'existence de différentes tâches propres à la formation qu'il est impératif de ne pas confondre : tâche à apprendre, tâche formatrice, et tâche d'utilisation du système).

Les aspects associés de modélisation et de description des tâches d'opérateurs humains constituent un champ investi depuis de longues années en ergonomie. Ils fournissent déjà des outils irremplaçables pour la conception de systèmes adaptés aux utilisateurs, pour la simulation des tâches et pour la construction de formations (e.g. John & Kieras, 1996; Patrick, 1992; Sebillote, 1991). Pour nombre d'entre eux, ces outils offrent un double intérêt. D'une part, ils répondent à la contrainte d'être opérationnels pour décrire de façon fine les résultats de l'analyse du travail en situation réelle ; d'autre part, ils sont suffisamment formels pour pouvoir être implantés dans le cadre d'un système sans un coût d'adaptation trop élevé. Un avantage supplémentaire réside dans le fait qu'avec un ou plusieurs modèles implantés, il devient possible, dans un même environnement virtuel, de distinguer dans les actions et le comportement de l'utilisateur, ce qui est lié à sa tâche principale, et ce qui est autre dans son comportement. Enfin dans l'optique où un formalisme de décomposition en buts et sous-butts alternatifs est utilisé, il devient assez simple d'autoriser l'utilisateur à mettre en œuvre une grande variété de procédures, tout en maintenant la cohérence dans l'interprétation des objectifs de l'utilisateur.

Peu d'EV incluent un modèle des tâches de haut niveau, i.e. où la tâche est décrite aussi au niveau des objectifs plutôt qu'au seul niveau des actions élémentaire, toutefois des systèmes récents semblent y avoir recours avec succès (e.g. Johnson et al., 1999).

Opérativité et analyse des représentations mentales

La psychologie scientifique et l'ergonomie fournissent depuis bon nombre d'années des

données sur le fait que les caractéristiques des perceptions ou des représentations des sujets humains ne sont pas en parfaite corrélation avec les propriétés métrologiques du monde physique ; elles proposent aussi des méthodes permettant de recueillir, mesurer et caractériser le contenu et les caractéristiques fonctionnelles de la représentation mentale de ces sujets, en fonction de facteurs tels que l'expertise et la tâche à réaliser (e.g. Bisseret, Sebillotte, & Falzon, 1999). L'ergonomie cognitive a contribué à souligner que les caractéristiques de ces déformations sont souvent le fruit d'une économie cognitive qui permet aux sujets de réaliser, très rapidement et à moindre coût, les tâches pour lesquelles ils sont entraînés. Dans ce sens, les déformations observées chez le sujet expert définissent les propriétés de ce que l'on appelle une représentation opérative ou opérationnelle, par opposition à la représentation mentale que construirait un novice dans une situation identique.

L'analyse des caractéristiques de la représentation opérative permet d'intervenir à deux niveaux de la conception des EV. D'une part, ce type d'étude permet de relever certaines des inadéquations entre l'information engendrée par les dispositifs d'interaction et les caractéristiques de l'activité cognitive de l'utilisateur. D'autre part, l'analyse des déformations peut fournir un guide pour structurer et redistribuer l'information adaptée dans différentes modalités d'interaction de l'EV. Enfin s'ils gagnent en flexibilité, les EV peuvent offrir un instrument de recherche et d'investigation sur les représentations opératives.

Certaines limites doivent toutefois être marquées, comme le souligne Sperandio (1984, p 84) du fait que la représentation mentale de l'expert n'est pas seulement le reflet de l'objet, mais le reflet de l'action projetée sur l'objet ; un même objet peut par conséquent engendrer une multiplicité de représentations, y compris chez un même opérateur si les objectifs de l'action changent ou s'ils sont multiples. Du point de vue pratique de la spécification d'interface, il faut que de telles représentations soient compatibles avec la diversité des utilisateurs possibles, et la diversité des objectifs d'action.

III.3.3 Les interfaces

Il a été souligné ailleurs que l'utilisabilité des EV s'avère insuffisante en l'état actuel. La conception d'interface dans le domaine des EV n'est pas une tâche aisée : le concepteur d'interface se retrouve face à de nombre de descriptions d'applications et d'expériences particulières sans ordre, sans organisation véritable et sans nomenclature commune (Hinckley et al., 1994, p 213). L'une des origines probables de ce problème réside dans l'orientation majoritaire des recherches à étudier de façon isolée certains types de périphériques d'interaction, en essayant de les comparer et de les évaluer à partir de l'observation des comportements d'utilisateurs (Wingrave, Bowman, & Ramakrishnan, 2001). Des outils de formalisation et d'assistance à l'implantation commencent à être proposés (voir e.g. Willans & Harrison, 2001).

Nous présentons à la suite quelques éléments et recommandations concernant les choix pour la conception des interfaces.

Paradigme d'asservissement vue-périphériques de mouvement dans les EV

En pratique, le choix d'une modalité de contrôle du point de vue sur la scène virtuelle est fortement dépendant de plusieurs facteurs parmi lesquels la tâche à réaliser, ses conditions de réalisation (individuel vs coopération) et le nombre d'utilisateur partageant la même vue. Plusieurs modèles types peuvent être distingués :

- La métaphore de la caméra (Hinckley et al., 1994) consiste à asservir la vue à tout mouvement ou action réalisés par la main ; cette vue serait efficace, couplée avec

une plan de situation en vue large. Cette métaphore représente d'une certaine façon le point de vue de l'outil.

- La métaphore de la scène (Hinckley et al., 1994) consiste en la fourniture d'une vue de la scène plus large, telle que l'utilisateur puisse manipuler les objets visibles indépendamment du changement de point de vue. Cette métaphore représente plutôt le point de vue du télé-manipulateur qui observe l'esclave à travers la vitre.

Deux autres métaphores apparaissent plus particulièrement orientées vers une tâche de navigation : la métaphore du conducteur de véhicule, et la métaphore du lancer de rayon (Hinckley et al., 1994).

- La conduite de véhicule décrite par Hinckley et col. (1994) est, de notre point de vue, une variante heuristique de la métaphore de la caméra. Sa particularité vient de la contrainte, sur la modification de la vue, par les possibilités 2D ou 3D de "déplacement du véhicule" ; l'angle de vue sur le monde virtuel est panoramique avec plusieurs degrés de liberté pour son exploration. Cette métaphore représente le point de vue d'un utilisateur pilotant un véhicule virtuel.
- Le lancer de rayon reprend le principe du lancer d'un rayon ou d'un cône lumineux dans une scène en trois dimensions. L'utilisateur indique une cible à l'aide du rayon ou du cône afin de naviguer et opérer des manipulations dans le monde virtuel.

Stone (1994) souligne que les valeurs extrêmes de la latence de réponse du système (plus de 400 ms), s'accompagnent d'une détérioration du contrôle du mouvement. Surtout dans un EV bien connu, le comportement de l'utilisateur va correspondre à anticiper sur les mouvements apparents, i.e. le sujet initie les gestes avant que le mouvement de la tête ne soit effectivement pris en compte par le système. Quand il existe des grands temps de latence, les chances sont alors grandes pour que les vecteurs enregistrés soient différents (plus précoces) que ceux voulus par l'utilisateur. De plus, l'avance de l'utilisateur sur le système peut l'amener à "poursuivre" les réactions du système, plutôt que les commander.

Visualisation d'information (en 3D)

Le casque de vision, ou HMD (Head-Mounted Display) est probablement le dispositif de visualisation par excellence de la réalité virtuelle. Les dispositifs larges de visualisation (grand écran, centre/murs d'images etc.) semblent toutefois porteurs d'usages plus directement et plus rapidement opérationnels dans le cadre d'une activité professionnelle, et notamment dans la formation. En effet, les problèmes de mal des simulateurs sont généralement plus importants dans le cas des casques que dans le cas des grands écrans.

Quel que soit le dispositif, il est préférable d'avoir un taux de rafraichissement d'image élevé (au moins 15 images/ sec et de limiter l'ampleur des mouvements induits à l'image (Johnson et al., 2001) ; une astuce supplémentaire réside dans le choix des "paysages virtuels" qui doivent être les plus larges possibles, de façon à minimiser les malaises.

En l'absence de restriction visuelle, quatre catégories d'information peuvent être utilisées pour véhiculer une information sur la profondeur (Reinhardt-Rutland, Annett, & Gifford, 1999): l'information *mono-oculaire* (accommodation²⁴ et autres processus d'ajustement de l'oeil à la distance), l'information binoculaire (convergence²⁵, disparité

²⁴ Ajustement de la courbure de l'œil pour projeter une image précise sur la rétine.

²⁵ Rotation des yeux de façon à éviter le phénomène de double vision d'un objet fixé (diplopie).

binoculaire²⁶), l'information de mouvement (parallaxe associée au mouvement²⁷) et l'information picturale (taille relative, occlusion²⁸, ombre et éclairage²⁹, occlusion/disocclusion associée au mouvement³⁰). Les trois premières sont plutôt liées à des caractéristiques physiologiques et neurologiques propres au système perceptif humain. Reinhardt et al. (1999) rapportent que d'après la littérature, 10% de la population générale fait preuve d'un déficit de la fonction binoculaire. Toutefois dans la vie courante, cela ne semble pas les handicaper, une perception adéquate de la perception de la profondeur pouvant être maintenue lorsque l'un des types d'information n'est pas utilisable par le sujet.

L'information picturale, quant à elle, regroupe les éléments d'une représentation en deux dimensions (photo, dessin, écran) qui véhiculent une information de profondeur. Une synthèse de ces types d'éléments est donnée dans le *Tableau 4*.

	<i>Catégorie</i>	<i>Degré de précision</i>	<i>Efficacité/impact</i>
Accommodation, et autres ajustements oculaires	Mono-oculaire	Information absolue	Limitée, interagirait probablement avec les autres informations
Convergence	binoculaire	Information absolue	Limitée, interagirait probablement avec les autres informations
Disparité binoculaire	binoculaire	Information relative	Excellente pour les distances proches
Parallaxe associée au mouvement	mouvement	Information relative	Mitigée, sauf si le mouvement est important ; les études suggèrent que l'information de mouvement est plutôt inefficace si ce n'est améliorer l'efficacité de l'information picturale
Taille relative	picturale	Information relative	Bonne
Occlusion	picturale	Information ordinale	Excellente
Ombre et éclairage	picturale	Information relative	Bonne
Occlusion / disocclusion cinématique	Mouvement et picturale	Ordinale - relative	Probablement excellente

Tableau 4 résumé des sources d'information visuelle de profondeur d'après Reinhardt et al 99

Il n'y a, à notre connaissance, que très peu d'études sur l'impact direct sur l'apprentissage. Dans des tâches autres que l'apprentissage, Reinhardt et al (1999), la projection directe des images directement sur chaque œil peut être extrêmement inconfortable, ce qui peut être attribué – comme dans le cas des systèmes s'appuyant

²⁶ Séparation des deux images rétinienne consécutives à la distance entre les deux yeux.

²⁷ Lorsque un observateur se déplace relativement à un objet statique dans son champ visuel, un mouvement systématique sur la rétine en découle ; le rapport de ce mouvement visuel augmente avec l'augmentation de la distance de fixation.

²⁸ Un objet plus proche occulte tout objet plus éloigné le long de la ligne du regard.

²⁹ Les objets les plus brillants tendent à apparaître plus proches que ceux dans l'ombre.

³⁰ Ce dernier type n'est pas purement pictural dans la mesure où il l'information picturale est aussi couplée à l'information de mouvement

sur des lunettes à cristaux liquides – au conflit entre la disparité binoculaire, la convergence et l'information mono-oculaire. Une autre étude des mêmes auteurs suggère que l'amélioration dans la perception visuelle liée à l'utilisation de quelque système de vision offrant la stéréoscopie que ce soit, dans le cadre d'une activité de chirurgie invasive minimale, est anihilée par l'accroissement de l'inconfort associé à l'utilisation de tels systèmes.

Dans une revue (Stanney et al., 1998), les auteurs rapportent des résultats mitigés sur le bénéfice de la vision stéréoscopiques dans les EVs. D'une part, la performance des sujets peut s'avérer aussi bonne sans vision stéréoscopique, dès lors qu'une information de perspective est superposée à la scène virtuelle³¹. D'autre part, la supériorité éventuelle d'un dispositif de visualisation stéréoscopique sur un dispositif monoscopique semble fortement dépendant de la tâche à accomplir, de la visibilité et de l'apprentissage. Pour des tâches simples de manipulation, les indices monoculaires de profondeurs et l'expérience du sujet seraient suffisants pour être efficace ; à l'inverse, ils ne seraient pas suffisant lorsque la tâche devient complexe, ce qui se traduirait par une amélioration de la performance en vision stéréoscopique (Stanney et al., 1998).

D'un point de vue pratique, il y a un intérêt à utiliser des effets de transparence ou de semi-transparence des surfaces (Hinckley et al., 1994) ; d'une part, ce type d'effet fournit une information de type occlusion pouvant aider dans la perception de la profondeur ; d'autre part, cela peut fournir également un contexte, dans la mesure où les objets d'arrière-plan ne sont pas complètement cachés.

Entrées 3D

L'information spatiale en entrée, à travers notamment le geste dans sa fonction ergotique (Cadoz, 1994a)³², est un aspect important de l'interaction des utilisateurs avec les EV. L'interaction gestuelle se trouve facilitée lorsqu'un référentiel spatial cohérent avec l'EV est construit aisément, voire adopté spontanément par l'utilisateur.

Hinckley et al. (1994) distinguent les *dispositifs fixes* (joystick, souris, clavier etc.) d'avec les *périphériques libres* (caméra, capteur magnétique, etc.) d'entrée d'information spatiale en 3 dimensions (position, déplacement, mouvement). A partir d'une synthèse de travaux, Hinckley et al. (1994) proposent plusieurs principes de conception de dialogues utilisant des *périphériques libres* (dont certains restent probablement à valider/étudier) :

- Utiliser les contraintes de la tâche pour minimiser le nombre de degrés de liberté de l'interface; une tâche contrainte par 2 degrés de liberté devient ardue à réaliser avec un dispositif de commande à 6 degrés de liberté.
- Introduire un objet réel que l'utilisateur puisse utiliser comme référentiel pour contrôler relativement ses gestes et ses mouvements lorsqu'il interagit en 3D³³.
- Privilégier le geste relatif à un repère constitué par un objet réel ou un segment corporel de l'utilisateur, plutôt qu'obliger l'utilisateur à opérer un déplacement dans

³¹ par exemple, un treillis représentant la perspective spatiale avec des lignes projetées.

³² La fonction ergotique du geste correspond à la fonction du geste en tant qu'action motrice comme par exemple dans les tâches de télé-manipulation ; le geste sémiotique se caractérise par la fonction de faire connaître une intention, de communiquer une information symbolique.

³³ Dans le projet SOFI, cette solution a montré sa supériorité par rapport à d'autres alternatives pour gérer le dialogue de l'utilisateur avec ses outils virtuels : l'utilisateur dispose à son côté d'une "boîte ouverte sans fond" par l'intermédiaire de laquelle il peut déposer par le geste ou accéder aux objets virtuels qu'elle contient.

l'espace pour atteindre une position absolue. Hinckley et al. (1994) soulignent que les utilisateurs ont beaucoup de difficultés à se mouvoir et réaliser des gestes dans un espace aux références absolues, alors que l'introduction d'un repère et de gestes relatif à ce repère accroît l'efficacité et diminue la nécessité d'un apprentissage préalable.

- Exploiter la coopération "naturelle" des deux mains dans la réalisation des gestes. En effet, l'usage des deux mains permet à l'utilisateur d'exploiter sa propre capacité directe à savoir précisément où ses deux mains sont situées l'une relativement à l'autre (Hinckley et al., 1994). Guiard (1987) cité par Hinckley et al. (1994) énonce trois principes pour la conception de dialogues efficaces. *Premièrement*, le mouvement de la main dominante trouve typiquement sa référence spatiale dans le mouvement de l'autre main ; en d'autres termes, il est plus efficace que le mouvement de la main dominante soit réalisé relativement à la position/au mouvement de l'autre main qui fournit la référence. *Deuxièmement*, les deux mains sont impliquées dans des échelles temps-espace asymétriques : la cinématique de la main dominante est caractérisée par une fréquence temporelle et spatiale élevée, et des mouvements précis et détaillés ; l'autre main se caractérise par une fréquence temporelle et spatiale faible, de faibles mouvements et une fonction de stabilisation. *Troisièmement*, la contribution de la main non dominante au mouvement commence avant celle de la main dominante. Le caractère exhaustif de ces principes pour garantir une bonne utilisabilité est parfois remis en cause, suggérant d'autres aspects à prendre en compte (Kabbash, Buxton, & Sellen, 1994).
- Fournir un outil réel, avec une masse, une forme analogue voire identique à l'objet virtuel etc. Les manipulations de l'utilisateur sont alors grandement facilitées, par comparaison avec l'interaction au moyen d'un gant seul associé à un capteur, par exemple, du fait de plusieurs facteurs concurrents (Hinckley et al., 1994) : d'une part les contraintes cinématiques de la main et du poignet diffèrent ; ainsi certaines rotations, simple à réaliser en tenant l'objet avec les doigts, sont difficiles à réaliser avec la main et le poignet. D'autre part, la masse et l'inertie de l'outil d'interface permet éventuellement de diminuer l'impact et l'amplitude des petits mouvements et tremblements involontaires. Enfin, les propriétés physiques de l'objet suggèrent les contraintes et la façon d'utiliser l'objet, en même temps qu'est conservé un retour kinesthésique proche ou exacte.
- Regrouper sur un seul périphérique les dimensions perçues comme corrélées et/ou sémantiquement reliées à une même information par les utilisateurs. A l'inverse, l'efficacité est plus grande si l'on découple sélectivement des autres l'information perçue comme indépendante (Hinckley et al., 1994). La détermination de ses relations entre variable n'est pas directe, nécessitant une analyse cognitive de l'activité des utilisateurs.

Mécanismes de repositionnement/recalibration

L'interaction avec un EV impliquant le traitement d'une information spatiale en trois dimensions nécessite généralement l'intégration d'un dispositif de repositionnement ou de recalibration pour l'utilisateur en cours de tâche. Il s'agit à la fois de pallier les défauts d'utilisabilité actuels de la technique, mais aussi d'offrir aux utilisateurs plus de degrés de liberté dans les gestes et l'action.

Le principe consiste à fournir un mécanisme d'appariement entre la position absolue actuelle et une nouvelle position logique, afin de permettre à l'utilisateur de choisir une position de confortable dans l'espace réel comme centre pour les actions et déplacements dans l'espace virtuel (Hinckley et al., 1994). Ces auteurs distinguent trois types de mécanisme dans les systèmes actuels :

- **Commande** : l'utilisateur envoie explicitement la commande de repositionnement à l'application ; cela inclut les commandes de recentrage, et les commandes de retour à une position de départ ou de référence.
- **Desembrayage**³⁴ : l'utilisateur active un dispositif d'embrayage, déplace le périphérique, relâche le dispositif d'embrayage, repositionne sa main confortablement puis recommence. les mouvements sont réalisés au moyen d'une série de cycles de prise-relachement.
- **Repositionnement par l'application** : le mécanisme, théoriquement invisible pour l'utilisateur, est géré par des mécanismes internes à l'application ; il peut s'agir d'un repositionnement en continu ; un autre exemple est l'usage d'un outil maintenu dans la main non dominante, dont la position va servir pour définir un référentiel à partir duquel les autres outils se déplacent avec l'autre main.

³⁴ "ratcheting"

IV Etude des représentations de la réalité virtuelle et de l'usage des simulateurs dans la formation

IV.1 Recueil d'entretiens

IV.1.1 Les sites visités

A ce jour, 7 sites ont été visités, 25 entretiens semi-dirigés ont été menés et 24 ont été retranscrits. La répartition des entretiens déjà retranscrits selon les Entreprises/Laboratoires concernés est la suivante:

- **AFPA** (Association pour la Formation Professionnelle des Adultes), où 1 entretien avec 1 formateur spécialiste du domaine des nouvelles technologies et de la réalité virtuelle pour la formation a été mené.

- **Projet I3D INRIA** (Institut National de Recherche en Informatique et Automatique de Rocquencourt, Yvelines) où 4 entretiens ont eu lieu avec 4 concepteurs de systèmes basés sur les techniques de la réalité virtuelle.

- **EUROCONTROL** (Centre européen pour le contrôle aérien, Brétigny-sur-Orge, 91) où 5 entretiens avec 4 concepteurs et 1 formateur dans le domaine de la simulation et/ou réalité virtuelle ont été recueillis.

- **SNCF** (Société Nationale des Chemins de Fer), où 10 entretiens ont été menés avec 4 concepteurs, 4 formateur et 2 ergonomes travaillant dans le domaine des simulateurs et/ou de la réalité virtuelle.

- **Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris** (CAOR – équipe Réalité Virtuelle), 2 entretiens ont été menés avec 2 concepteurs spécialisés dans le domaine.

Université René Descartes, Paris 5 (Laboratoire d'Ergonomie Informatique), où 2 entretiens ont été menés avec 2 ergonomes ayant participé à des projets relatifs à la conception de simulateurs/systèmes à base de réalité virtuelle.

IV.1.2 Modalités de passation

Les entretiens se sont déroulés sur chaque site concerné, dans un local isolé où la confidentialité des informations recueillies pouvait être respectée. Ils ont été menés à l'aide d'une grille d'entretien (voir Annexe 1), de façon semi-directive et ont été enregistrés sur bande magnétique, après avoir obtenu l'accord des personnes interviewées. Les entretiens duraient de 45 minutes à une heure en moyenne et ont été conduits par Jean-Marie Burkhardt, Marion Wolff (Maîtres de Conférences au LEI), Kristell Collet, Céline Meignant et Isabelle Tran (stagiaires au LEI). Chaque entretien était non nominatif, afin de respecter l'anonymat, mais les personnes étaient choisies selon leur spécialité (réalité virtuelle, simulation) et leur fonction (formateur, concepteur ou ergonome).

Ces 24 entretiens ont fait l'objet d'une analyse de discours (à l'aide du logiciel *Tropes*), d'analyses géométriques (Analyse en Composantes Principales – ACP - , Classification Ascendante Hiérarchique – CAH -), puis d'une analyse post-factorielle de manière à approfondir certains points. Dans un dernier temps, nous avons effectué une nouvelle analyse du discours sur la CAH. Ci-après, sont développés les fondements de ces méthodes, les différentes analyses et leurs résultats.

IV.2 Analyse discursive des entretiens

La méthode d'analyse de contenu de ces différents corpus repose sur l'*Analyse Propositionnelle du Discours* (APD), méthode décrite dès 1985 par Ghiglione, Matalon et Bacri, puis perfectionnée dans les dernières années (Ghiglione & Blanchet, 1991), aussi bien au plan conceptuel (Ghiglione, Kekenbosch, & Landré, 1995 ; Ghiglione, Landré, Bromberg, & Molette, 1998) qu'au plan technique, pour devenir l'*Analyse Cognitivo Discursive* (ACD), mise en œuvre à l'aide du logiciel *Tropes*³⁵. L'APD tout comme l'ACD, au contraire de l'analyse thématique, veut préserver la "naïveté" du lecteur ; elle s'inspire en cela de l'approche expérimentale, qui vise avant tout la reproductibilité des analyses. L'interprétation ne se fera qu'en dernier lieu. "La structure d'univers simple" mise en scène par un interlocuteur est abordée par les principaux objets qui occupent l'univers en question (en ce qui nous concerne : "l'univers de la simulation et de la réalité virtuelle"). Ghiglione (1991b) définit ces objets comme "*les termes autour desquels s'ordonnent les réalisations langagières*" (p.48), ce sont les Référents Noyaux (RN).

Les RN ont déjà fait l'objet d'études, notamment dans le cadre de l'analyse du discours politique (Ghiglione & Casari, 1989), de l'entretien de recherche (Blanchet, 1991a et 1991b), de l'entretien d'enquête (Castel, 1995) ou de l'analyse de l'expertise (Wolff, 1996 ; Wolff, Rouanet & Grosgeorge, 1998, Wolff et Sperandio, 2000, 2001). Ces objets sont peu nombreux, occupent des places fixes dans leur univers et y organisent un bon nombre de propositions. Ils peuvent être regroupés avec leurs équivalents paradigmatiques (pronoms personnels, possessifs, démonstratifs). D'autres regroupements peuvent également avoir lieu par le biais des synonymes. Le choix des RN est établi à partir de leur fréquence d'apparition, mais pour la comparaison de textes, on peut conserver un RN fréquemment produit par une personne et peu par une autre (il s'agit en effet de caractériser si l'objet thématique³⁶ a un pouvoir structurant essentiel à l'intérieur du discours analysé). Afin de respecter la surface du texte, l'APD donne la proposition grammaticale comme unité de découpage de base (forme minimale la plus satisfaisante pour expliquer "*un micro-univers*"³⁷).

Cependant, avant d'élaborer un *scénario* d'analyse du discours (regroupement des RN significatifs propres à l'univers étudié), il est nécessaire d'effectuer une première analyse linguistique des discours, visant à valider les verbalisations³⁸.

IV.2.1 Examen de l'homogénéité des discours : style et mise en scène

Le langage assurant trois fonctions essentielles³⁹ par le biais d'opérateurs langagiers, nous pouvons faire l'hypothèse que l'étude de ces indices nous renseigne quant à certaines opérations de pensée et fiabilise les analyses statistiques ultérieures.

Nous avons tout d'abord procédé à une analyse comparative sur les 24 entretiens de

³⁵ Acetic.5, Rue du Helder. 75 009 Paris

³⁶ - utilisé au sens d'observable langagier.

³⁷ - Ghiglione (1991a) entend par micro-univers "une scène peuplée *a minima* d'un actant qui fait l'action et de l'acte que le verbe accomplit" (p.39).

³⁸ *Tropes* a également d'autres possibilités d'analyses, telles que l'analyse des rafales ou l'analyse des épisodes marquant d'un discours, que nous n'avons pas utilisées ici, puisque le but était de regrouper ensuite les discours individuels par site et par fonction et que le but n'était pas d'étudier de manière affinée le discours de chaque interviewé. Toutefois, lors de l'analyse post-factorielle que nous présenterons à la fin de cet exposé, nous avons mis en exergue les distinctions discursives existant entre les différentes classes issues de la Classification Ascendante Hiérarchique.

³⁹ Une fonction référentielle (description de l'état du monde), une fonction modale (traduction de l'état du locuteur, et une fonction d'acte (modification de l'état de l'auditeur).

manière à mieux cerner le discours des interviewés (homogénéité des uns par rapport aux autres), et à avoir la possibilité de les regrouper par site et/ou par fonction ultérieurement. Par ailleurs, cette première analyse nous permet d'effectuer une première évaluation de la validité des verbalisations recueillies en regard de notre objectif d'étude.

Si le nombre de propositions ou le nombre de mots utilisés ne peut servir de référence à la comparaison, puisque les discours ne sont pas exactement de même durée, on peut se fonder sur deux autres indicateurs pour vérifier la cohérence et l'homogénéité des discours : le style utilisé et le type de mise en scène favorisé.

Les différents styles possibles sont les suivants :

- **argumentatif** : le sujet s'engage, argumente, explique ou critique pour essayer de persuader l'interlocuteur.
- **narratif** : un narrateur expose une succession d'événements, qui se déroulent à un moment donné, en un certain lieu.
- **énonciatif** : le locuteur et l'interlocuteur établissent un rapport d'influence, révèlent leurs points de vue.
- **descriptif** : un narrateur décrit, identifie ou classe quelque chose ou quelqu'un

Le fait que le style majoritairement utilisé soit le style argumentatif laisse supposer que les 24 personnes interrogées se sont réellement impliquées dans l'interview et ne se sont pas contentées de décrire ou de commenter des situations données. Elles ont effectué des déclarations quant à l'état des faits, les actions qu'elles ont menées, les sentiments qu'elles ont éprouvés.

L'utilisation essentiellement de verbes statifs, de modalisations, de joncteurs particuliers (voir paragraphes a) à d) ci-après) déterminent ce style, constituant ainsi un ensemble cohérent.

a) - La catégorisation des verbes

Dans l'ouvrage de 1991 (p.51-58), Ghiglione propose trois catégories verbales, mais la version 1998 du logiciel *Tropes* en propose quatre :

- les verbes factifs qui font référence "à la transcription langagière d'une action" (verbe générique : faire) : travailler, courir, lancer, jeter... On retrouve également dans cette catégorie des verbes comme : savoir, oublier, regretter, se douter qui "présupposent la vérité/réalité du référent" (Jakobi et Wuillemin-Sales, 1994, p.252).

- les verbes statifs qui renvoient "à la transcription langagière d'un état ou d'une possession" (verbes génériques : être ou avoir non utilisés, dans ce cas, comme auxiliaires) : ressembler, aller, se sentir, manquer, provoquer, demander, comprendre, rester, subir ...

- les verbes déclaratifs qui renvoient "à la transcription langagière d'une déclaration sur un état, une action, un être, un objet, un sentiment"...(verbe générique : dire) : penser, croire, voir, falloir, pouvoir, devoir, juger...

- les verbes performatifs qui ont la particularité d'accomplir, par le fait de leur énonciation à la 1ère personne du singulier du présent, l'acte qu'ils énoncent : je te promets que..., j'ordonne, je déclare, je veux⁴⁰, ...

Par ailleurs, le mode et le temps du verbe donnent la possibilité au locuteur de moduler la réalité de son univers. A titre d'exemple, nous citerons les travaux de Ghiglione (1989) relatifs au discours des hommes politiques. Ces derniers utilisent, en effet, préférentiellement le présent de l'indicatif lorsqu'ils s'expriment par le biais des médias, mais cette préférence apparaît moins nettement quand ils produisent leur élocution à l'assemblée nationale !

⁴⁰ - Pour Benveniste (1966), il n'y a performatif que lorsqu'il y a, dans la forme même du verbe, la désignation de l'acte.

b) - Les modes et les temps verbaux

L'indicatif se réfère essentiellement à la réalité, le subjonctif au possible, et le conditionnel à l'incertain. Ce dernier peut, tout comme le subjonctif, également renvoyer à un univers irréel ou contrefactuel (Ghiglione, 1991b, p.57) .

L'univers mis en scène par le locuteur est également intensifié par le temps du verbe.

c) - La modalisation

Indépendamment des verbes qui servent à désigner ce qui s'accomplit, et mettent en scène la vérité/réalité du monde (- modalisateurs verbaux du type : je pense, je crois...ou prédicats modaux du type il faut que, on doit... qui sont inclus dans une subordonnée⁴¹), et des modes et temps verbaux, la fonction modale du langage (qui sert à traduire l'état du locuteur ; Ghiglione, 1991b) est également assurée par l'utilisation de modalisateurs adverbiaux (adverbes d'affirmation : certainement, bien, certes..., de doute : peut-être, de négation : non, rien, nullement, jamais..., d'intensité : aussi, un peu, beaucoup, trop...). Ces modalisateurs adverbiaux (liés aux relations énonciatives du discours) se distinguent dans le discours du locuteur ; ainsi, les adverbes d'affirmation, de doute et de négation portent sur l'ensemble de l'énoncé et ont une portée plus forte que les modalisateurs d'intensité, lesquels ne gèrent qu'une partie de l'énoncé, mais dont la fonction est de traduire l'état du locuteur.

Les modalisations permettent à celui qui parle de s'impliquer dans ce qu'il dit ou de situer ce qu'il dit dans le temps et dans l'espace.

Peuvent également être ajoutés à cette liste les modalisations (liées aux relations circonstancielles du discours) qui mettent en scène :

- une relation temporelle : alors, après, demain, bientôt, déjà, maintenant...
- une relation de lieu : arrière, avant, dedans, derrière..
- une relation de manière : ainsi, bien, comme, mal, plutôt, vite...

Ces derniers descripteurs permettent de mieux situer la référence dans le monde, de la mettre en situation, tout comme le font certains joncteurs dits également de relation circonstancielle

d) - Les joncteurs

Le locuteur peut établir des relations circonstancielles entre un énoncé et sa situation extra-linguistique. Ces relations (conjonctions de coordination et de subordination) peuvent faire référence :

- au temps : quand, lorsque, avant que...
- au lieu : où, jusqu'où...
- à la manière : comme, sans que...
- au but : puisque,...

Outre les noms et pronoms qui constituent la proposition (en se référant aux objets du monde), les joncteurs, qui définissent les relations argumentatives des propositions entre elles, servent également à décrire l'état du monde pour assurer la fonction référentielle du langage :

Les joncteurs peuvent également être liés aux relations argumentatives : ces relations argumentatives, qui participent à la cohérence du discours du locuteur, peuvent faire référence à:

- la condition : **si** la personne démarre son train et **si** tout d'un coup le mouvement s'arrête...
- la cause : **parce que** le problème d'un conducteur, c'est de savoir où il se trouve.
- l'addition : je peux vous parler du réalisme **et** de la fidélité.
- la disjonction : ils vont recevoir cette commande de freinage **ou** de défreinage..

⁴¹ - Il s'agit essentiellement de verbes déclaratifs

- l'opposition : *on a l'environnement le plus réaliste possible, mais limité...*
- la comparaison : *les conducteurs vont faire comme dans la réalité.*
- le but : **pour que** *l'image soit correcte, on tourne aux environs de 50 à 60 Hertz de rafraîchissement d'images par seconde.*

D'une manière générale, on peut dire que (Ghiglione et al., 1998) :

- les joncteurs et modalisations de temps et de lieu permettent de situer l'action,
- les modalisations d'intensité et de négation permettent de dramatiser le discours,
- les joncteurs de cause et de condition permettent de construire un raisonnement,
- les joncteurs d'addition permettent d'énumérer des faits ou des caractéristiques,
- plus particulièrement, les joncteurs d'opposition permettent à la fois d'argumenter, de relativiser et de présenter des points de vue opposés.

Quant aux différents types de mise en scène, on distingue :

- dynamique, action : utilisation massive de verbes d'action (factifs)
- ancrée dans le réel : emploi des verbes d'état (statifs)
- prise en charge par le narrateur : déclaration sur un état, une action (verbes déclaratifs).

Pour les 24 personnes, la mise en scène est ancrée dans le réel ou implique de la dynamique/action. Les interviewés donnent donc accès à leurs pensées et ne se fondent pas sur le caractère narratif de leurs différentes actions.

L'utilisation des verbes statifs est ici privilégiée (exemples : *il y a ce scénario, qu'il faut suivre bien évidemment*) ainsi que l'utilisation de verbes déclaratifs (exemples : *il faut que l'on teste, mais a priori ça ne devrait pas changer grand chose ; ils peuvent même interrompre s'ils pensent qu'il y a une erreur grave*). Les verbes factifs, favorisant la description de faits, d'actions (exemples : *les périphériques ont été testés ; on a travaillé sur la réalité ; on utilise des casques en immersion*) sont également présents dans le discours des interviewés, mais à moindre taux (par rapport aux statifs additionnés des déclaratifs).

Les temps les plus utilisés sont l'indicatif passé (les interviewés relatent des événements passés) et présent (ils se réfèrent à la réalité du moment pour donner leur avis quant aux différents équipements et matériels utilisés). Ils se réfèrent ainsi essentiellement à la réalité.

IV.2.2 Création du scénario d'analyse des verbalisations

Le logiciel *Tropes* (Ghiglione et al., 1998) effectue un traitement sémantique automatique de classification et de contraction (classification des RN, définis lors des paragraphes précédents et leur regroupement en différents univers). C'est un outil d'aide à l'interprétation, permettant plusieurs niveaux de lecture du texte. Le traitement d'analyse d'un texte, tel qu'il est réalisé par *Tropes*, comprend deux analyses principales : une analyse morpho-syntaxique (désambiguïser certaines catégories) et une analyse sémantique. L'analyse sémantique a la particularité de ne s'intéresser qu'au sens des mots et de ne pas tenir compte de la façon dont ils s'écrivent (par exemple : *conducteur* et *opérateur* sont considérés comme des équivalents pour la compréhension du texte).

Lorsque le traitement est terminé, on peut consulter et retraiter les résultats afin d'obtenir une interprétation fiable correspondant à un scénario d'analyse du contenu du discours. Grâce à ces outils, on peut faire émerger le contexte, qualifier les principaux acteurs, visualiser l'environnement d'une référence, en effectuant des regroupements.

Enfin, *Tropes* utilise un lexique général de la langue pour repérer les différentes catégories (substantifs, adjectifs, verbes, modalisations,...) qui peuvent également rejoindre les premières classes d'équivalents. Ainsi, les catégories ne sont pas déterminées a priori par l'analyste, mais c'est le discours qui les organise. La subjectivité du codeur se trouve ainsi mise à l'écart.

Le scénario adopté pour l'analyse des 24 entretiens regroupe ainsi 19 univers définis avec leurs classes d'équivalents. Pour chaque classe d'équivalents présentée, le pluriel et le féminin sont pris en compte. Les univers sont présentés dans le Tableau 5, dans l'ordre alphabétique et font référence aux différents sites visités.

Univers	Classes d'équivalents
APPRENANT	agent, apprenant, apprenti, appris, armée, Asct, chauffeur, conducteur, contrôleur, débutant, élève, enfant, entraîné, étudiant, formé, métallurgiste, novice, pilote, soldat, soudeur, stagiaire, suivi, tractionnaire.
AVANTAGE	aide, aider, amélioration, améliorer, atout, avantage, bénéfice, bien, chance, efficace, efficacité, favoriser, importance, intérêt, meilleur, mérite, mieux, possibilité, privilégier, super, supériorité, surtout.
ERGONOMIE	ergo, ergonomie, ergonomique, facile, intuitif, naturel, utilisabilité.
FIDELITE	fidèle, fidélité.
FORMATION	apprendre, apprentissage, démonstration, école, enseignement, enseigner, entraînement, entraîner, essai, exercice, faire_faire, formation, formation_continue, former, pédagogie, pédagogique, progression, stage, training.
IMAGE	affichage, faire_voir, image, imagination, laisser_voir, représentation, symbole, symbolisation, visualisation.
IMMERSION	immergé, immerger, immersif, immersion.
INTERACTION	interactif, interaction, interactivité, interagir
INTERFACE	capteur, casque, clavier, écran, gant, interfaçage, interface, interfacer, joystick, magasin_virtuel, petit_écran, phantom, pointeur, pupitre, souris, tapis, tapis_roulant, tracker, visio_casque, visio_cube, workbench.
LIMITE	complexe, complexité, complication, compliqué, compliquer, défaillance, défaut, désavantage, désavantager, dysfonctionnement, dysfonctionner, écueil, empêchement, empêcher, ennui, entrave, erreur, incohérence, inconvenient, léser, limite, limité, limiter, mal, malaise, mauvais, moins, nul, obstacle, pénaliser, piège, problème, restriction, risque, rupture, souci.
METHODOLOGIE	besoin, cahier_des_charges, estimation, estimer, évaluation, évaluer, fonctionnalité, méthode, recette, spécification, test, validation, valider, validité.
REALISME	impression, réalisme, réaliste, reality, ressentir, sensation, sentir.
REALITE	conforme, conformité, identique, réalité, réel, terrain, vrai.
SCENARIO	frame, scénario, scène, script.
SENS	3_D, 3_dimensions, auditif, audition, champ_de_vision, geste, goût, haptique, kinesthésie, kinesthésique, mouvement, odeur, odorat, œil, olfactif, olfaction, optique, ouïe, perception, retour_d'effort, sens, sensoriel, stéréoscopie, tact, tactile, texture, toucher, trois_dimensions, vibration, vision.
SIMULATION	copie, simul, simulation, simulé, simuler.
TÂCHE	procédure, tâche.
TECHNOLOGIE	application, bibliothèque, configuration, design, informatique, logiciel, matériel, micro_ordinateur, modeleur, noyau, ordinateur, périphérique, programmation, programme, programmer, prototype, système, technologie.

UTILISATEUR	utilisateur.
--------------------	--------------

Tableau 5 univers et classes d'équivalence pour le scénario d'analyse des verbalisations.

D'autres univers correspondant aux 24 locuteurs tels que : simulateur (et les noms correspondant aux différents appareils évoqués), réalité virtuelle (et ses dérivés), formateur (et ses dérivés), ergonomiste ou concepteur seront indexés avec les 24 sujets, auteurs des discours, lors des analyses géométriques seront indexées avec les 24 sujets, auteurs des discours, lors des analyses géométriques.

Les univers trop connotés et/ou liés à une fonction spécifique (tels que : apprenant, formation, utilisateur, simulation), ou peu discriminants (tels que avantage, limite, méthodologie ou technologie) ont été déclarés "univers secondaires". A ce titre, ils figureront en "variables supplémentaires" lors des analyses géométriques ultérieures. Ce statut particulier sera expliqué lors des paragraphes suivants.

IV.3 Analyse géométrique des données

iv.3.1 De l'analyse du discours au tableau de données

	Fidélité	Image	Immersion	Interaction	Interface	Réalisme	Réalité	Sens	Tâche	Ergonomie	Scénario
1	2.462	7.385	0.923	0.308	2.154	2.462	12.615	5.846	0.615	0.000	1.846
2	1.235	3.704	6.996	4.938	11.111	7.819	10.700	16.049	0.000	0.823	0.412
3	3.175	3.175	3.704	2.646	10.053	10.053	8.995	14.815	1.058	0.000	0.000
4	3.209	3.743	6.417	0.535	5.882	6.952	10.160	13.904	0.000	1.070	0.535
5	0.940	10.972	3.135	2.821	10.972	7.837	6.270	15.674	0.940	0.627	0.940
6	2.128	0.000	1.418	0.000	4.965	1.418	19.149	2.128	0.000	1.418	0.000
7	1.762	1.322	0.881	0.441	6.167	1.322	7.048	4.405	0.881	0.881	3.084
8	0.606	10.303	2.424	0.606	6.667	7.273	4.242	15.758	0.606	1.212	0.606
9	0.552	2.210	0.000	0.000	3.867	2.210	10.497	4.420	1.657	2.210	0.552
10	1.172	0.781	0.781	0.000	6.250	1.172	5.859	2.344	3.125	0.781	0.391
11	0.632	6.316	1.474	0.000	6.105	5.474	9.053	8.000	3.789	1.263	3.368
12	0.529	3.175	0.794	0.000	0.529	3.968	12.963	3.175	3.968	0.000	6.349
13	2.353	4.412	3.529	2.647	2.353	8.529	10.294	1.471	3.235	0.000	4.706
14	0.820	2.186	3.005	3.552	12.568	3.552	12.568	2.459	1.366	2.186	0.273
15	3.509	4.261	0.752	0.000	6.266	2.506	8.521	5.013	0.752	0.752	0.251
16	2.865	1.563	3.385	1.042	3.906	3.646	10.417	3.906	0.781	3.906	0.521
17	2.947	6.090	0.786	0.000	1.768	8.251	9.430	1.572	0.589	0.786	1.179
18	2.976	2.381	3.571	0.000	10.417	6.250	10.119	0.893	0.893	1.190	0.000
19	2.473	1.374	6.868	1.648	8.242	6.044	5.220	10.714	0.275	2.198	0.000
20	4.167	2.083	0.833	0.000	5.833	3.333	7.500	2.500	1.250	0.000	3.333
21	0.000	2.924	1.170	4.094	0.000	0.000	7.602	8.772	0.000	0.585	1.754
22	3.984	1.992	0.797	5.578	3.187	3.187	7.171	2.390	1.195	0.000	3.187
23	0.986	14.398	0.592	0.000	4.339	5.917	6.114	5.917	0.000	0.394	0.197
24	0.839	2.725	0.839	0.2100	6.289	3.983	8.805	3.145	0.000	1.048	1.887

Tableau 6 Pourcentage de références citées par les 24 sujets pour les 11 principaux univers. Exemple d'interprétation pour la case, en haut à gauche, contenant la valeur "2.462" pour le

couple "sujet 1/Fidélité": sur l'ensemble des références citées par le sujet 1, environ 2.5% sont consacrées à l'évocation de la fidélité

Pour le discours de chaque personne interviewée, nous avons appliqué le scénario d'analyse ainsi constitué et relevé le nombre de références évoquées. Les discours n'étant pas de longueurs équivalentes, nous avons rapporté pour chaque sujet, le nombre de références citées par univers, par rapport au nombre total de références émises. Le Tableau 6 résume ces informations.

Le Tableau 7 ci-après indique les pourcentages de références citées pour les univers secondaires. A droite du tableau, nous avons fait figurer l'indexation nécessaire au repérage des différentes fonctions exercées (1 : Formateur ; 2 : Concepteur ; 3 : Ergonome), des différents sites d'appartenance (1 : AFPA ; 2 : INRIA ; 3 : Eurocontrol ; 4 : SNCF ; 5 : Paris5 ; 6 : école des Mines), des domaines étudiés (1 : RV ; 2 : Simulateur).

	Avantage	Limite	Formation	Apprenant	Utilisateur	Méthodologie	Technologie	Simulation	Total 2 tableaux	Fonction	Site	Domaine
1	5.846	15.077	21.846	9.231	0.000	2.769	4.923	3.692	100	1	1	1
2	6.173	5.350	2.058	1.646	2.058	0.412	16.461	2.058	100	2	2	1
3	9.524	8.466	4.762	0.529	1.058	4.233	9.524	4.233	100	2	2	1
4	12.299	9.091	4.278	0.535	8.021	1.604	7.487	4.278	100	2	2	1
5	8.150	5.329	1.254	0.627	1.881	2.508	13.480	5.643	100	2	2	1
6	7.801	12.057	7.092	12.766	2.837	9.929	4.255	10.638	100	1	3	2
7	11.454	7.489	5.727	14.978	1.322	3.965	18.943	7.930	100	2	3	2
8	14.545	4.848	4.242	5.455	4.242	6.061	8.485	1.818	100	2	3	1
9	14.365	8.287	1.105	21.547	0.000	9.392	6.077	11.050	100	2	3	2
10	9.375	9.375	2.734	28.516	1.563	1.563	1.953	22.266	100	2	3	2
11	17.474	7.789	10.526	6.105	0.421	3.789	3.368	5.053	100	2	4	2
12	8.995	12.169	14.550	10.317	1.058	5.026	10.053	2.381	100	1	4	2
13	7.941	12.647	12.353	5.588	0.882	3.235	10.882	2.941	100	2	4	1
14	12.022	5.738	8.197	12.295	2.186	6.011	3.825	5.191	100	3	4	1
15	9.774	13.784	9.774	12.531	0.000	3.008	10.777	7.769	100	2	4	2
16	9.115	12.500	7.813	3.125	6.510	4.948	17.708	2.344	100	3	5	1
17	11.198	10.413	10.020	9.037	0.589	4.519	5.894	14.931	100	3	5	2
18	14.583	6.250	12.202	5.952	2.381	9.524	8.333	2.083	100	2	6	1
19	10.714	17.857	2.747	2.473	0.275	5.495	9.615	5.769	100	2	6	1
20	9.167	10.000	22.083	18.750	0.000	4.583	2.917	1.667	100	3	4	2
21	8.772	7.018	31.579	14.620	0.000	5.263	4.678	1.170	100	2	4	1
22	8.765	9.562	22.311	17.928	0.000	4.382	2.789	1.594	100	2	4	1
23	11.045	8.876	14.793	10.256	0.197	2.959	10.454	2.564	100	1	4	2
24	14.885	15.933	7.966	4.193	3.145	3.564	19.078	1.468	100	2	4	2

Tableau 7 Pourcentage de références citées par les 24 sujets pour les 8 univers secondaires et indexation des sujets

Comme ces tableaux sont constitués de données numériques, issues de 19

"paramètres-univers de référence" que nous appellerons dorénavant *variables statistiques ou variables*, nous avons opté pour une analyse géométrique particulière : l'Analyse en Composantes Principales standard (dite aussi normée), dont nous exposerons les principes généraux ci-après.

IV.3.2 Principes de l'approche géométrique de l'analyse de données multivariées

Le principe de l'approche géométrique de l'analyse des données multidimensionnelles consiste "*à représenter les données sous forme de nuages de points dans des espaces géométriques, et à fonder l'interprétation sur les proximités et les oppositions entre points...*" (Le Roux, Richard et Rouanet, 1995, p. 650). Ces nuages de points sont construits à partir de tableaux de données numériques et se trouvent, la plupart du temps, dans des espaces à plus de 3 dimensions. Comme le rappellent Le Roux, Richard et Rouanet (op. cit.), la théorie mathématique sous-jacente est la géométrie multidimensionnelle, dont l'objet de base est le nuage euclidien. On distingue ainsi deux espaces : *l'espace des individus et l'espace des variables*.

Pour un exposé détaillé de la méthode, on se référera à Rouanet et Leroux (1993) et pour des exemples d'utilisation à Wolff (à paraître).

Protocole de base

Le protocole de base est ici constitué de 24 sujets et pour lesquels on dispose de différentes références citées lors de leur discours, exprimées en pourcentages. Après avoir effectué des analyses univariées classiques (étude des distributions, indices de centralité, dispersion), une Analyse en Composantes Principales standard (ACP) sera utilisée sur ce protocole. L'ACP standard peut être aussi définie comme l'analyse des corrélations.

L'espace des individus

Dans notre étude, le protocole des 24 sujets peut être représenté comme un nuage de points dans un espace à 11 dimensions (les 11 principaux univers de référence). Le profil d'un sujet, constitué de l'ensemble des références qu'il a citées, est donc représenté par un point dans l'espace géométrique. Dans le cas de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) standard (ou normée) utilisée dans cette recherche, la distance entre deux sujets est définie, pour chaque univers (chaque variable), par la différence entre les résultats qu'ils ont respectivement obtenus pour une variable donnée ; cette différence est élevée au carré puis divisée par l'écart-type de cette variable. On effectue ensuite la somme des valeurs obtenues pour l'ensemble des variables. En divisant chaque écart de performances par l'écart-type de la variable en question, on obtient ainsi une différence mesurée en unités d'écart-type, donc en "notes réduites". Toutes les variables étudiées ont ainsi la même importance dans l'analyse. *L'espace des individus* se présente sous la forme d'un ensemble de *points*, avec ses structures affines (propriétés d'alignement et de parallélisme) et euclidiennes (propriétés de distances et d'angles).

L'espace des variables

Les 11 variables exprimées en "notes réduites" sont représentées par des vecteurs dans un espace à 24 dimensions (les 24 sujets, dans notre étude). Le coefficient de corrélation entre deux variables est ici le cosinus de l'angle que forment les vecteurs. Si l'angle est petit, la valeur du cosinus sera proche de 1, ce qui indique que la corrélation est élevée ; si les vecteurs représentant les variables sont perpendiculaires (ou orthogonaux) : la valeur du cosinus est alors égale à 0, ce qui indique une corrélation

nulle. S'il n'existait aucune corrélation entre les variables, elles seraient représentées par 11 axes orthogonaux (étant donné que les vecteurs représentant les variables doivent former un angle dont le cosinus est égal au coefficient de corrélation entre les variables). *L'espace des variables est défini comme un espace vectoriel euclidien.* L'objectif de l'Analyse en Composantes Principales est de trouver un nombre plus limité d'axes orthogonaux pour "résumer" au mieux les données. Un nouvel espace est ainsi constitué, dans lequel on pourra visualiser :

- les 11 variables représentées par l'angle que fait chacune d'elles avec chacun des axes, appelés également composantes principales ou variables factorielles (l'interprétation de chacun des axes retenus sera effectuée en fonction de la qualité de la représentation de ces variables sur chacun de ces axes),
- les 24 sujets représentés sur chacun des axes par les coordonnées de la projection du point représentant le profil d'un sujet. Pour ce qui concerne notre étude, nous avons préféré annuler le statut de l'individu en tant que tel afin de mettre plutôt en exergue le statut des Fonctions (fonction 1 : Formateur, fonction 2 : Concepteur, fonction 3 : Ergonome), des Sites (site 1 : AFPA, site 2 : INRIA, site 3 : site 4 : SNCF, site 5 : Paris 5, site 6 : école des Mines) et des Domaines étudiés (domaine 1 : Réalité Virtuelle ou RV, domaine 2 : Simulation). Nous travaillerons ainsi sur les points moyens de groupements d'individus et non sur les points individuels. Ces différents statuts ont été indexés dans le tableau de base ; il s'agit des facteurs Fonction, Site et Domaine (trois dernières colonnes du tableau 1), qui revêtent un caractère qualitatif dans notre analyse.

L'interprétation des axes se fera d'une part à partir des groupements d'individus (élaborés en fonction des 3 facteurs définis ci-dessus) proches sur l'axe, dont la contribution à la variance de l'axe est forte), d'autre part à partir des variables (forte contribution à la variance de l'axe). Les deux espaces "variables" et "individus" n'ayant pas le même statut, ni des rôles symétriques, il convient donc de les analyser séparément.

Certaines variables et/ou individus peuvent être traités en éléments supplémentaires si l'analyste le désire ; ils ne participeront pas ainsi à la construction des axes, mais seront simplement projetés sur les axes. Ce sera le cas des 8 univers secondaires, auxquels nous donnerons le statut de *variables supplémentaires*.

IV.3.3 Statistiques élémentaires

Moyennes et variances

Pour chaque fonction, site ou domaine étudié, les moyennes et variances par variable analysée ont été calculées (voir Tableaux 1 à 6 en Annexe 2). Il résulte de ces premières statistiques que :

La **fonction** est associée à des intérêts différenciés dans le discours. Ainsi :

- les formateurs ont plutôt tendance à focaliser leur discours sur la formation (moy = 14.57 %), la référence au réel et au terrain (moy = 12.71%), les limites (moy = 12.04%) et les apprenants (moy = 10.64%),
- les concepteurs voient plus les avantages (moy = 11.17%),
- les ergonomes mettent plus l'accent sur la formation (moy = 12.03%), les apprenants (moy = 10.80%) et les avantages (moy = 10.38%).

Suivant le **site**, il apparaît des similitudes et des particularités dans les éléments structurants le discours :

- l'AFPA insiste beaucoup sur la formation (moy = 21.85%), les limites (moy = 15.08%) et la référence au réel, aux situations de terrain (moy = 12.62%),
- Eurocontrol se centre plutôt sur les apprenants (moy = 16.65%), les avantages des systèmes (moy = 11.51%) et la simulation (moy = 10.74%),
- la SNCF a plutôt tendance à se référer à la formation (moy = 15.41%), les apprenants (moy = 11.26%) et met en parallèle les avantages (moy = 10.88%) et les limites des systèmes (moy = 10.35%),
- Paris 5 émet surtout des avis sur la technologie (moy = 11.80%), les limites (moy = 11.46%) et les avantages (moy = 10.16%) des différents systèmes
- l'Ecole des Mines rejoint les ergonomes en se référant essentiellement aux avantages (moy = 12.65%) et aux limites (moy = 12.05%).
- l'INRIA se focalise plus sur les aspects sensoriels (moy = 15.11%) et sur la technologie (moy = 11.74%).

Enfin, les deux **domaines** de conception d'outils pour la formation que sont la Simulation et la Réalité Virtuelle se retrouvent en parlant essentiellement des avantages, des limites et de la formation.

Les dispersions pour chaque variable sont peu élevées. On pourra néanmoins noter que les variances les plus fortes concernent les apprenants et la formation, qui ne semblent pas constituer les préoccupations majeures de l'ensemble des interviewés.

Ces statistiques élémentaires montrent d'ores et déjà que les avantages et les limites, la formation, et les apprenants sont au cœur du discours, même si les deux dernières ne sont pas également représentées dans tous les discours. Ainsi, ces variables méritent bien leur statut de variables supplémentaires dans les analyses ultérieures. Ce résultat peut être considéré comme trivial au premier abord, du fait du guide d'entretiens d'une part, et des objectifs d'étude d'autre part. Pourtant, il amène à souligner deux aspects pour nous importants :

- Les données d'entretiens sont cohérentes avec notre objectif d'étude, ce qui valide la suite de l'analyse ;
- Les aspects peu discriminants constituent un point de vue partagé par les différentes fonctions sur la base des limites et avantages ; si des différences existent, elles s'expriment ailleurs.

Corrélations

La matrice des corrélations (voir Tableau 7 en Annexe 1) indique que les variables les plus corelées positivement sont :

Tâche et Scénario ($r = 0.64$),
 Scénario et Formation ($r = 0.44$),
 Image et Réalisme ($r = 0.43$),
 Immersion et Réalisme ($r = 0.57$),
 Immersion et Interface ($r = 0.53$),
 Immersion et Sens ($r = 0.58$),
 Immersion et Utilisateurs ($r = 0.46$),
 Interface et Sens ($r = 0.40$),
 Réalisme et Sens ($r = 0.50$),
 Ergonomie et Utilisateurs ($r = 0.48$),
 Apprenants et Simulation ($r = 0.53$),

L'interprétation de ces corrélations suggèrent les éléments suivants :

- Le domaine de la formation – ou tout au moins son outillage – s'appuie sur les

notions de tâche et de scénario. Les apprenants sont surtout évoqués lors des situations de simulation.

- Les personnes qui se réfèrent le plus à l'immersion, ont également tendance à parler beaucoup des interactions, des interfaces (en relation avec le réalisme et la perception sensorielle), de la capacité à représenter et des utilisateurs. Une bonne immersion est associée à la qualité des interactions des utilisateurs avec le système, et au fait que les images et les perceptions sensorielles soient réalistes.
- Les personnes qui se réfèrent à l'ergonomie font également référence aux utilisateurs, et insistent sur la méthodologie d'analyse de et de conception.

Les corrélations négatives les plus fortes indiquent des relations entre :

Immersion et Formation ($r = -0.42$),
 Interaction et Avantages ($r = -0.41$),
 Interface et Scénario ($r = -0.53$),
 Interface et Formation ($r = -0.58$),
 Réalisme et Apprenants ($r = -0.74$),
 Sens et Apprenants ($r = -0.58$),
 Ergonomie et Scénario ($r = -0.46$),
 Ergonomie et Formation ($r = -0.44$),
 Formation et Utilisateurs ($r = -0.40$),
 Formation et Simulation ($r = -0.41$),
 Apprenants et Utilisateurs ($r = -0.44$),
 Apprenants et Technologie ($r = -0.52$).

D'une manière générale, quand les interviewés évoquent la formation, ils ont tendance à occulter les versants immersion, interface et ergonomie (et vice et versa). De même, quand ils ont tendance à parler des apprenants, ils évitent l'évocation des utilisateurs, de la technologie, du réalisme et de la représentation des sens (et vice versa). Quand les interfaces sont mis en exergue, ce sont le scénario et la formation dont on parle le moins.

Ces premiers indicateurs vont être étudiés plus finement ci-après lors de l'ACP.

IV.3.4 Analyse en Composantes Principales des discours

Pour cette analyse, les 8 univers principaux ont été retenus comme *variables actives*, et les 11 univers secondaires comme *variables supplémentaires*, au sens où ce statut a été défini dans les paragraphes précédents.

Les 11 univers principaux concernent les références suivantes :

- Fidélité
- Image
- Immersion
- Interaction
- Interface
- Réalisme
- Réalité
- Sens
- Tâche
- Ergonomie
- Scénario

Les 8 univers secondaires concernent les références :

- Avantages
- Limites
- Formation

- Apprenants
- Utilisateurs
- Méthodologie
- Technologie
- Simulation

Quatre axes ont été retenus pour cette ACP (70.5% de la variance prise en compte).

Nous interpréterons dans un premier temps, le nuage des variables, puis nous nous intéresserons aux nuages des points moyens, constitués à partir des facteurs mis en place à partir des différents paramètres qualitatifs concernant les individus interviewés (Fonction, Site visité et Domaine étudié).

Nuage des variables

Variables actives	QLT	Axe 1			Axe 2			Axe 3			Axe 4		
		1#F	COR	CTR	2#F	COR	CTR	3#F	COR	CTR	4#F	COR	CTR
Fidélité	906	-47	2	1	-242	58	30	539	291	205	-745	555	481
Image	828	-277	77	24	693	480	243	-488	238	168	-179	32	28
Immersion	832	-787	620	194	-148	22	11	398	159	112	177	31	27
Interaction	461	-387	150	47	105	11	6	478	229	161	267	72	62
Interface	583	-712	506	158	-196	39	19	68	5	3	183	33	29
Réalisme	676	-633	401	125	432	187	94	282	80	56	-95	9	8
Réalité	399	300	90	28	-476	226	114	254	65	46	134	18	15
Sens	766	-791	626	196	332	110	56	-83	7	5	149	22	19
Tâche	700	521	271	85	351	123	62	277	77	54	479	229	199
Ergonomie	727	-206	42	13	-689	475	240	-311	97	68	337	114	99
Scénario	870	642	412	129	498	248	125	414	172	121	196	38	33
				1000			1000			1000			1000

Variables supplémentaires	QLT	Axe 1			Axe 2			Axe 3			Axe 4		
		1#F	COR	CTR	2#F	COR	CTR	3#F	COR	CTR	4#F	COR	CTR
Avantages	178	-6	0	0	-12	0	0	-388	150	0	167	28	0
Limites	244	315	99	0	-224	50	0	117	14	0	-285	81	0
Formation	374	488	238	0	201	40	0	136	19	0	-277	77	0
Apprenants	481	657	431	0	-148	22	0	-166	27	0	-19	0	0
Utilisateurs	242	-355	126	0	-331	110	0	-33	1	0	75	6	0
Méthodologie	306	231	54	0	-477	228	0	-144	21	0	60	4	0
Technologie	95	-289	84	0	-6	0	0	-67	4	0	84	7	0
Simulation	152	220	48	0	-234	55	0	-221	49	0	5	0	0
				0			0			0			0

Tableau 8 Coordonnées factorielles (#F), cosinus carrés (COR) et contributions relatives (CTR) des variables actives et supplémentaires aux axes 1, 2, 3 et 4 (attention, les valeurs sont multipliées par 1000).

Les variables actives les mieux représentés par ces 4 axes sont les variables Fidélité, Image, Immersion, Sens, Tâche, Ergonomie et Scénario (colonne QLT).

La variable Réalité est la moins bien représentée (QLT = 399).

Pour les variables actives, nous interpréterons les axes à l'aide des contributions relatives (colonne CTR). Nous retiendrons toutes celles dont la contribution est supérieure à une contribution moyenne, c'est-à-dire à 91 (1 divisé par 11 fois 1000).

Pour les variables supplémentaires, pour chaque axe, nous retiendrons les variables dont les cosinus carrés sont les plus élevés (par rapport aux autres axes).

L'axe 1 est représentatif de l'opposition entre le référent Scénario et les référents Immersion, Interface, Réalisme et Sens. Sur cet axe, on trouve également l'opposition entre d'un côté Formation, Apprenants et de l'autre Utilisateurs. La référence au scénario, lorsqu'elle est importante dans le discours des locuteurs, est associée souvent à la Formation ainsi qu'à des références aux Apprenants. Inversement, quand les références à l'Immersion, aux Interfaces, au Réalisme et aux Sens sont nombreuses, elles sont associées aux Utilisateurs le plus souvent. On pourrait définir cet axe comme l'opposition reflétant la distinction, traditionnelle dans le domaine de la conception, entre le domaine de problèmes et le domaine des solutions. Le point de vue du problème à traiter concernerait clairement ici la Formation (les Apprenants, le scénario etc.). De l'autre côté, nous trouvons les univers liés aux outils et à la technologie conçue (importance des références à l'Immersion, les Interfaces, le Réalisme, les Sens).

L'axe 2 représente l'opposition entre Image, Réalisme, Scénario d'un côté, et Réalité, Ergonomie, Méthodologie de l'autre. Cet axe semble opposer la question de la reconstruction d'une certaine partie du réel à l'intérieur d'un système artificiel –simulateur ou environnement virtuel (références au Réalisme, aux Images, au Scénario), avec l'expérience du monde réel, l'analyse, l'utilisabilité et l'ergonomie du système (références aux termes liés à la Méthodologie, la Réalité, l'Ergonomie).

Ci-après, les variables représentées dans leur espace géométrique (**Figure 1**).

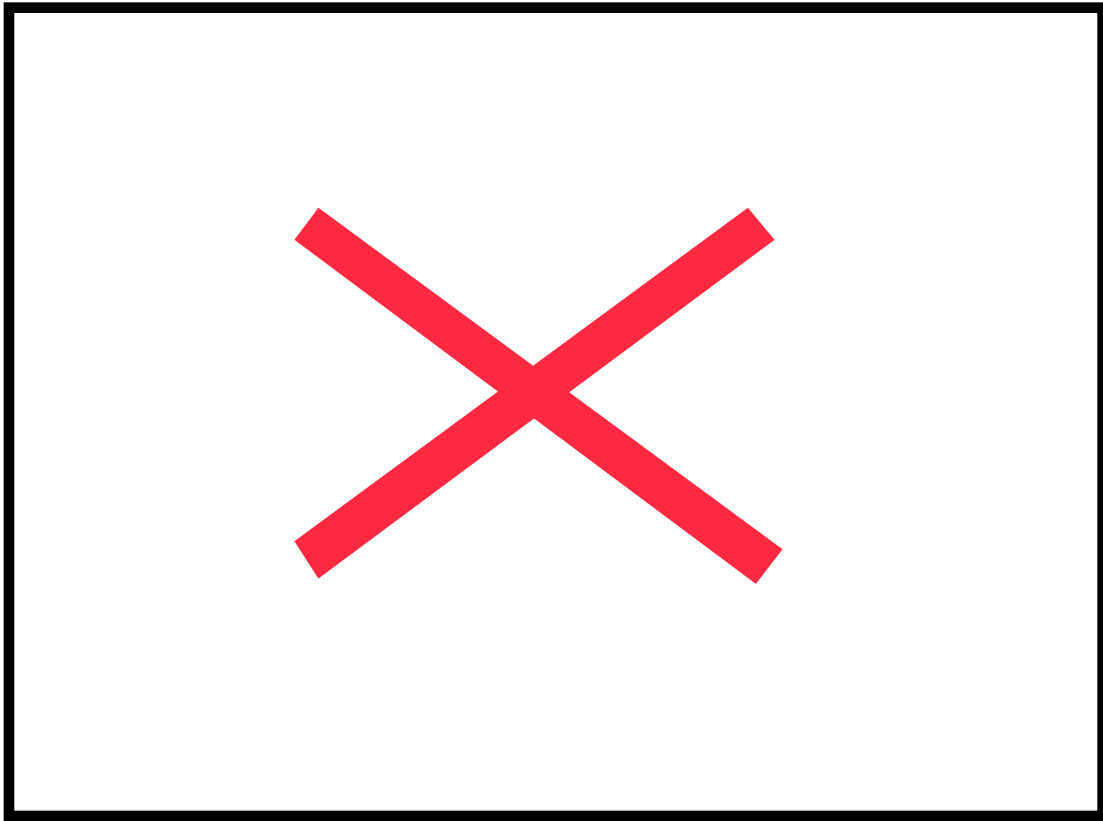


Figure 1 Nuage des variables actives et supplémentaires (Plan 1-2)

Légende

Rond plein: variables actives

Carré vide : variables supplémentaires

En rouge : variables actives contribuant aux axes 1 et/ou 2

En vert : variables supplémentaires représentées par l'axe 1 et/ou 2

En italiques : variables actives et supplémentaires non représentatives des axes 1 et 2

L'axe 3 (Figure 2) oppose les variables Fidélité, Interaction, Immersion, Interface, Scénario aux variables Image, Avantages.

On pourrait interpréter cet axe comme représentant d'un côté les aspects de conception relatifs à la fidélité et aux feed-back d'information utilisés dans l'interface pour gérer l'interaction avec l'utilisateur, et de l'autre côté les avantages associés, pour ce domaine en tout cas qu'est la formation, à la capacité à fournir des "images, des représentations" adaptées pour apprendre.

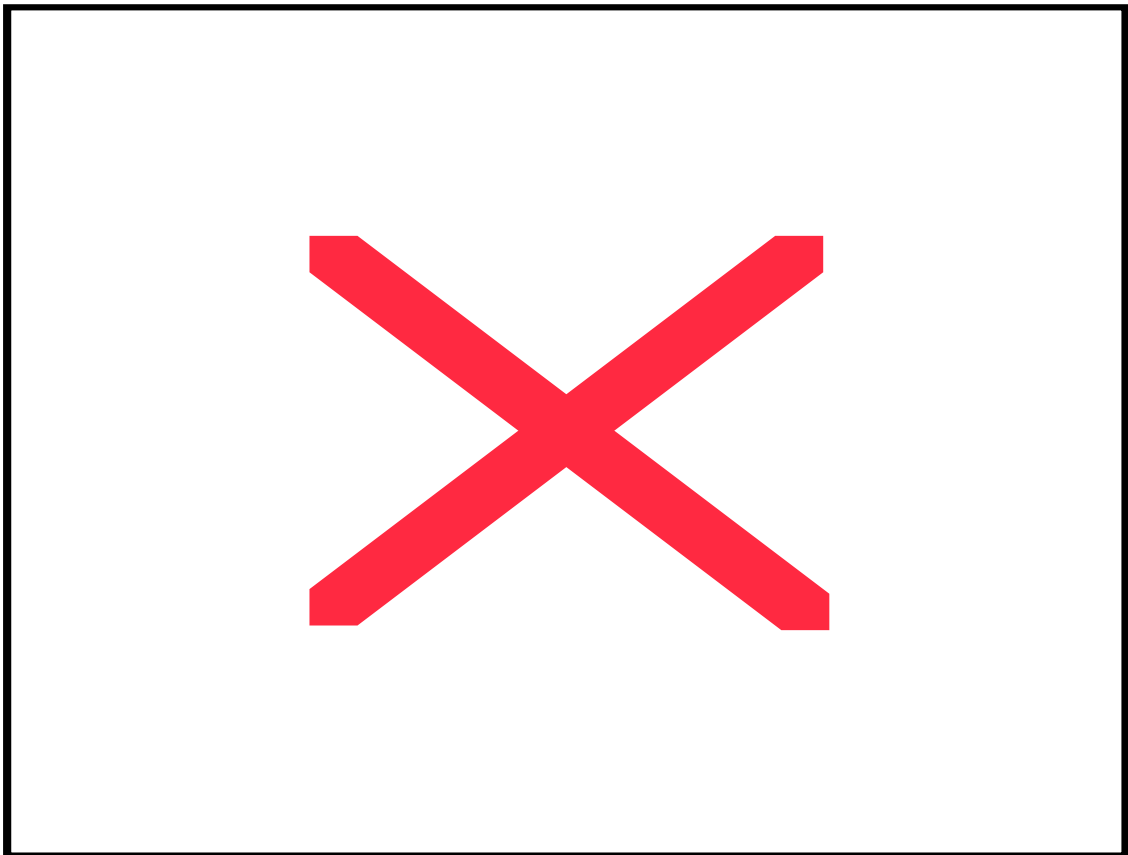


Figure 2 Nuage des variables actives et supplémentaires (Plan 1-3)

Légende

rond plein : variables actives

carré vide : variables supplémentaires

En rouge souligné : variables actives contribuant à l'axe 3

En rouge : variables actives contribuant à l'axe 1

En vert souligné : variable supplémentaire représentée par l'axe 3

En vert : variables supplémentaires représentées par l'axe 1

L'axe 4)(Figure 3) oppose essentiellement la Tâche et l'Ergonomie avec la Fidélité.

Cette opposition pourrait se traduire de la façon suivante. D'un côté se trouvent les personnes interviewées qui donnent plus d'importance à la Fidélité (par rapport à une situation de référence réelle). De l'autre côté, nous trouvons celles qui privilégient le point de vue de la tâche à effectuer/apprendre, ainsi que l'ergonomie du dispositifs.

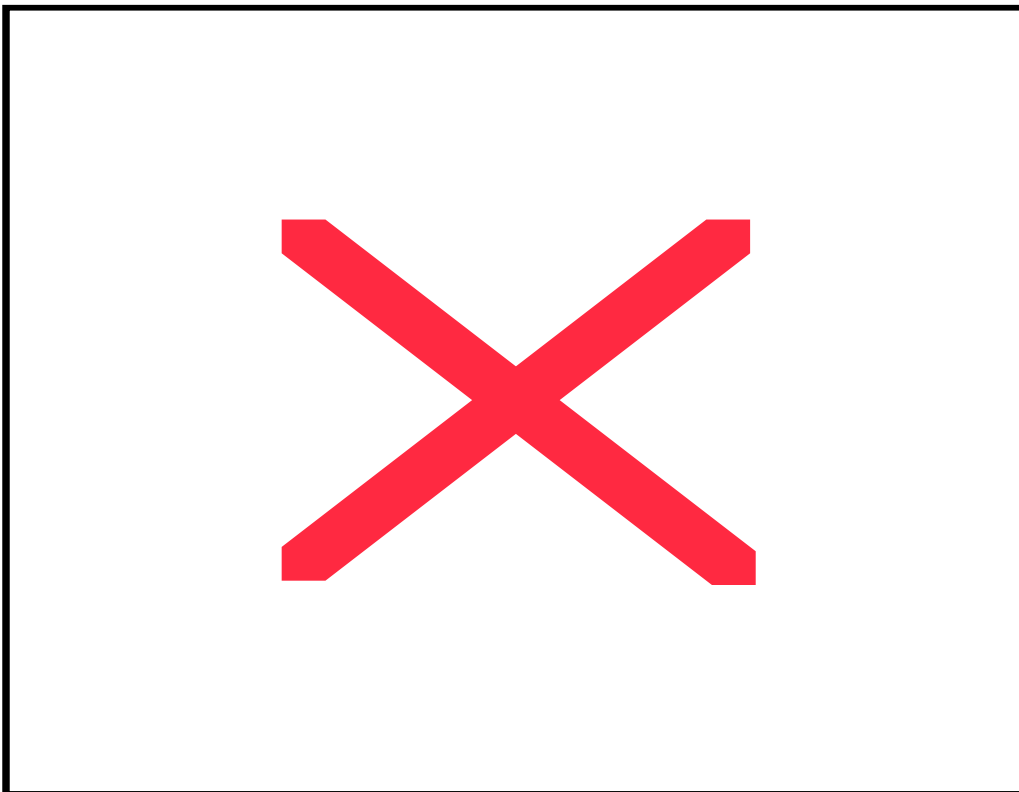


Figure 3 Nuage des variables actives et supplémentaires (Plan 1-4)

Légende

rond plein : variables actives

carré vide : variables supplémentaires

En rouge souligné : variables actives contribuant à l'axe 4

En rouge : variables actives contribuant à l'axe 1

En vert souligné : variable supplémentaire représentée par l'axe 4

En vert : variables supplémentaires représentées par l'axe 1

Nous allons maintenant compléter ces différentes informations par l'étude des nuages des points moyens, issus de groupements d'individus, réunis selon les 3 facteurs déterminés par la Fonction des interviewés, le Site visité et le Domaine étudié.

Nuages des points moyens

Dans cette partie, nous étudions trois nuages (fonctions, sites, domaines) à l'aide des écarts réduits (pour chaque variable, on a effectué : *(valeur observée moins la moyenne) divisé par l'écart-type*) et des contributions absolues des différentes modalités aux axes retenus.

Pour tous les tableaux ci-après, les légendes correspondantes sont :

FIDE : Fidélité

IMAG : Image

IMME : Immersion

INTN : Interaction

INTF : Interface

REAM : Réalisme

REAT : Réalité

SENS : Sens

AVAN : Avantage

LIMI : Limite

FORM : Formation

APPR : Apprenant

UTIL : Utilisateur

METH : Méthodologie

TECH : Technologie

SIMU : Simulation

TACH : Tâche

ERGO : Ergonomie

SCEN : Scénario

Les Fonctions

Les écarts réduits pour les trois fonctions sont données dans le Tableau 9

	FIDE	IMAG	IMME	INTN	INTF	REAM	REAT	SENS	TACH	ERGO	SCEN
Formateur	-0.33	0.61	-0.67	-0.71	-0.85	-0.47	1.13	-0.43	-0.02	-0.57	0.38
Concepteur	-0.08	-0.07	0.20	0.20	0.20	0.12	-0.34	0.30	0.02	-0.06	-0.07
Ergonome	0.64	-0.34	-0.14	-0.08	0.06	-0.01	0.25	-0.76	-0.11	0.82	-0.09

	AVAN	LIMI	FORM	APPR	UTIL	METH	TECH	SIMU
Formateur	-0.75	0.64	0.58	0.15	-0.33	0.27	-0.28	-0.13
Concepteur	0.21	-0.15	-0.21	-0.08	-0.01	-0.12	0.13	0.00
Ergonome	-0.07	-0.05	0.25	0.18	0.31	0.20	-0.24	0.12

Tableau 9 Tableau des écarts réduits selon la Fonction occupée

Plus les écarts réduits sont élevés, en valeur absolue, plus la fonction est extrême par rapport aux différentes variables étudiées. Les écarts réduits positifs indiquent que la fonction concernée a tendance à beaucoup évoquer certains thèmes et les écarts réduits négatifs indiquent le contraire (les écarts réduits proches de zéro indiquent une production moyenne des thèmes évoqués).

L'analyse du Tableau 9 montre que dans l'ensemble :

- Les formateurs ont tendance à centrer leur discours sur les images, le réel, le scénario mis en œuvre, les limites, la formation, les apprenants et la méthodologie.
- Les concepteurs évoquent plus volontiers l'immersion, les interactions, les interfaces, la représentation des sens, les avantages et la technologie.
- Les ergonomes insistent plus sur la fidélité, le réel, l'ergonomie, la formation, les apprenants, les utilisateurs et la technologie.

Ci-après, le nuage des points moyens des fonctions (Figure 4). Sur ce nuage, on voit que les formateurs s'opposent sur l'axe 1 aux concepteurs. Les ergonomes, mieux représentés par l'axe 2, ont une position "intermédiaire". Les tableaux suivants (**Tableau 10** et **Tableau 11**) indiquent que les fonctions sont les mieux représentés sur les 2 premiers axes.

	AXE1	AXE2	AXE3	AXE4
Formateur	1.457	0.280	-0.516	-0.281
Concepteur	-0.683	0.307	-0.142	0.083
Ergonome	0.335	-1.015	0.107	-0.287

Tableau 10 Tableau des coordonnées factorielles des fonctions

	AXE1	AXE2	AXE3	AXE4
Formateur	0.715	0.690	0.336	0.243
Concepteur	2.343	0.826	1.028	0.509
Ergonome	0.141	0.423	0.054	0.401

Tableau 11 Tableau des contributions absolues aux axes des fonctions

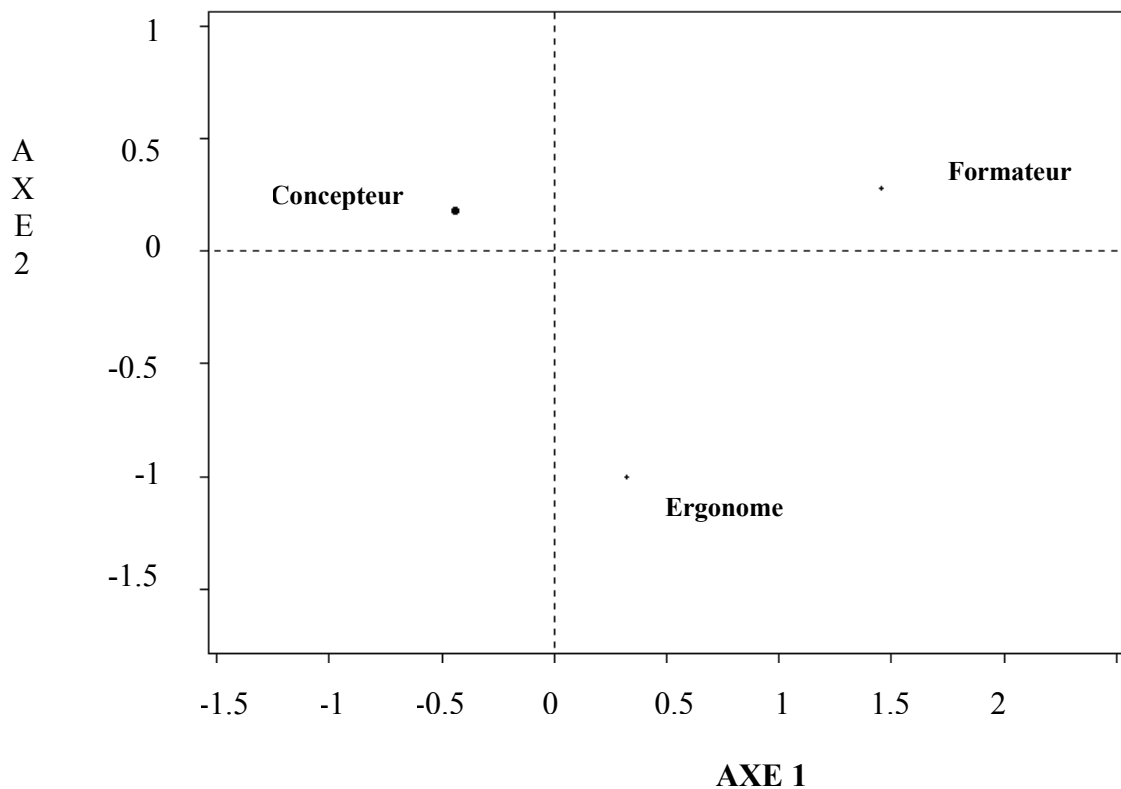


Figure 4 Nuage des points moyens des fonctions : Plan 1- 2. Note : la taille des marqueurs est proportionnelle au nombre de personnes constituant la fonction

Les sites

	FIDE	IMAG	IMME	INTN	INTF	REAM	REAT	SENS	TACH	ERGO	SCEN
AFPA	0.44	0.94	-0.68	-0.57	-1.10	-0.84	1.10	-0.12	-0.43	-1.07	0.22
INRIA	0.17	0.36	1.37	0.84	1.10	1.28	-0.06	1.70	-0.53	-0.38	-0.60
Euroc	-0.57	-0.35	-0.59	-0.63	-0.07	-0.76	0.04	-0.13	0.11	0.36	-0.33
SNCF	-0.12	0.09	-0.45	0.18	-0.32	-0.25	-0.05	-0.43	0.37	-0.38	0.63
Paris5	0.81	-0.09	-0.10	-0.45	-0.90	0.46	0.23	-0.74	-0.37	1.51	-0.37
Mines	0.66	-0.66	1.45	-0.27	1.05	0.53	-0.50	-0.13	-0.46	0.79	-0.89

	AVAN	LIMI	FORM	APPR	UTIL	METH	TECH	SIMU
AFPA	-1.65	1.51	1.53	-0.04	-0.83	-0.75	-0.77	-0.35
INRIA	-0.54	-0.80	-0.91	-1.22	0.77	-0.99	0.57	-0.28
Euroc	0.32	-0.41	-0.77	1.00	0.15	0.70	-0.17	1.08
SNCF	0.11	0.15	0.69	0.24	-0.44	-0.15	-0.19	-0.46
Paris5	-0.15	0.47	-0.15	-0.48	0.91	0.09	0.58	0.65
Mines	0.72	0.64	-0.34	-0.75	-0.08	1.26	0.03	-0.31

Tableau 12 Tableau des écarts réduits selon le Site visité

L'analyse des écarts réduits montre que :

- L'AFPA a plutôt un discours orienté sur la fidélité, les images, la réalité, les limites des systèmes, la formation.
- L'INRIA s'intéresse surtout à l'immersion, aux interactions, aux interfaces, au réalisme, aux sens, aux utilisateurs et à la technologie.
- Eurocontrol a tendance à évoquer plus particulièrement l'ergonomie, les

avantages, les apprenants, la méthodologie et la simulation

- La SNCF réfère beaucoup aux tâches, aux scénarios et à la formation de ses personnels.
- Paris 5 évoque la fidélité, le réalisme des système, le terrain réel (conformité), l'ergonomie, les différentes limites, les utilisateurs, la technologie utilisée et la simulation.
- L'école des Mines de Paris a un discours tourné vers la fidélité, l'immersion, les interfaces, le réalisme, l'ergonomie, pèse les avantages et les limites des systèmes, et se préoccupe de la méthodologie.

La Figure 5 résume ces différents points de vue.

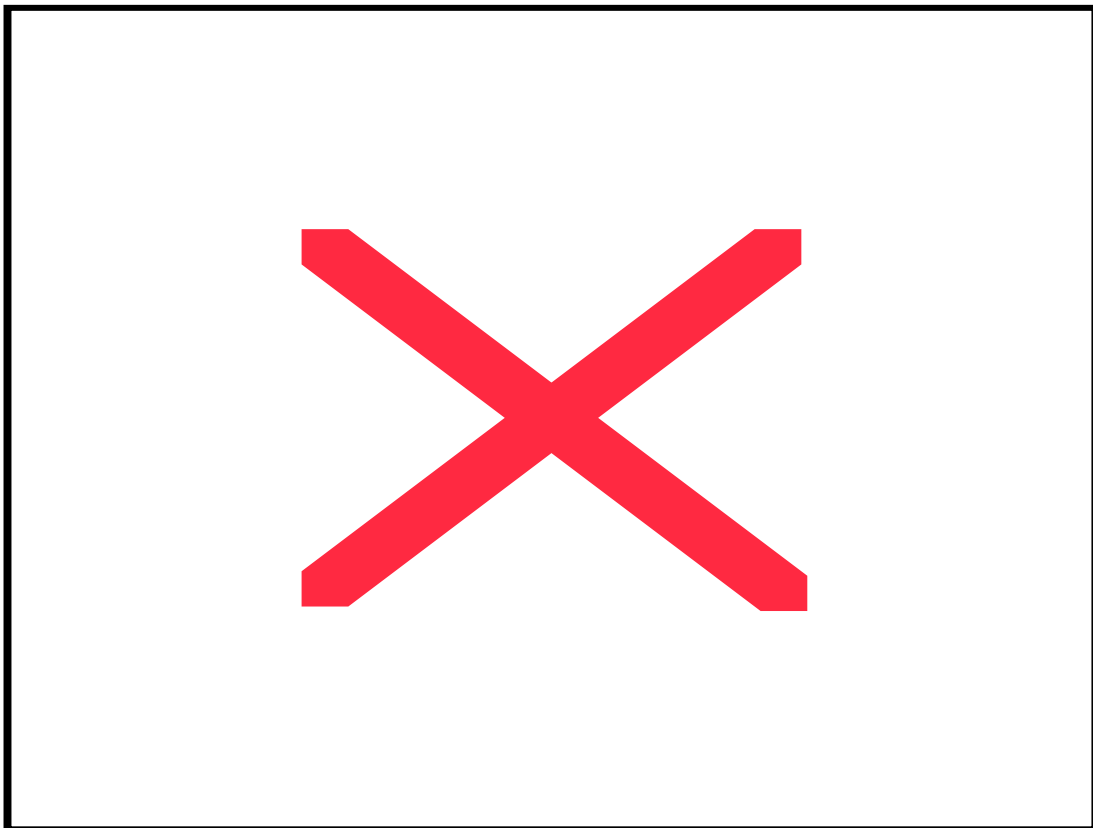


Figure 5 Nuage des points moyens des sites visités

	AXE1	AXE2	AXE3	AXE4
AFPA	1.316	0.407	-0.406	-1.196
INRIA	-2.828	0.569	0.723	0.092
Eurocont.	0.701	-0.595	-0.910	0.345
SNCF	0.927	0.514	0.177	0.100
Paris5	0.278	-1.155	-0.265	-0.701
Mines	-1.667	-1.269	0.409	-0.242

Tableau 13 Tableau des coordonnées factorielles des sites

	AXE1	AXE2	AXE3	AXE4
AFPA	0.072	0.007	0.007	0.060
INRIA	1.385	0.208	0.214	0.120
Eurocont.	0.498	0.596	0.282	0.070
SNCF	0.910	0.719	0.894	0.751
Paris5	0.019	0.313	0.006	0.130
Mines	0.314	0.135	0.014	0.023

Tableau 14 Tableau des contributions absolues des sites aux axes

Sur l'axe 1, on constate une opposition entre les sites qui ne pratiquent que de la Réalité Virtuelle (à gauche : école des Mines et INRIA, qui ne comportent par ailleurs que des concepteurs) et ceux, dont les personnels interviewés pratiquent essentiellement de la simulation.

L'AFPA contribue peu à la construction des différents axes, mais il rejoint le côté "simulation" car son discours comporte beaucoup de points communs avec ces sites (préoccupations liées à la formation et aussi à l'ergonomie).

L'axe 2 est surtout représentatif de Eurocontrol et de Paris 5. Leur discours se préoccupant des utilisateurs, de la méthodologie et de l'ergonomie.

Les domaines

	FIDE	IMAG	IMME	INTN	INTF	REAM	REAT	SENS	TACH	ERGO	SCEN
RV	0.13	0.05	0.61	0.61	0.27	0.35	-0.09	0.43	-0.24	0.10	-0.20
Simu	-0.15	-0.06	-0.72	-0.72	-0.32	-0.42	0.10	-0.51	0.28	-0.12	0.24

	AVAN	LIMI	FORM	APPR	UTIL	METH	TECH	SIMU
RV	-0.24	-0.18	0.05	-0.47	0.28	-0.08	0.05	-0.44
Simu	0.29	0.21	-0.05	0.56	-0.33	0.09	-0.06	0.51

Tableau 15 Tableau des écarts réduits selon le Domaine étudié

L'analyse des écarts réduits suggèrent :

- Les personnes oeuvrant dans le domaine de la Réalité Virtuelle ont tendance à évoquer l'immersion, les interactions, les interfaces, le réalisme, la représentation des sens et les utilisateurs.
- Dans le domaine de la Simulation, le discours est plus centré sur les tâches à accomplir, les scénarii à élaborer, la simulation, et met en parallèle les avantages et les limites des systèmes utilisés.

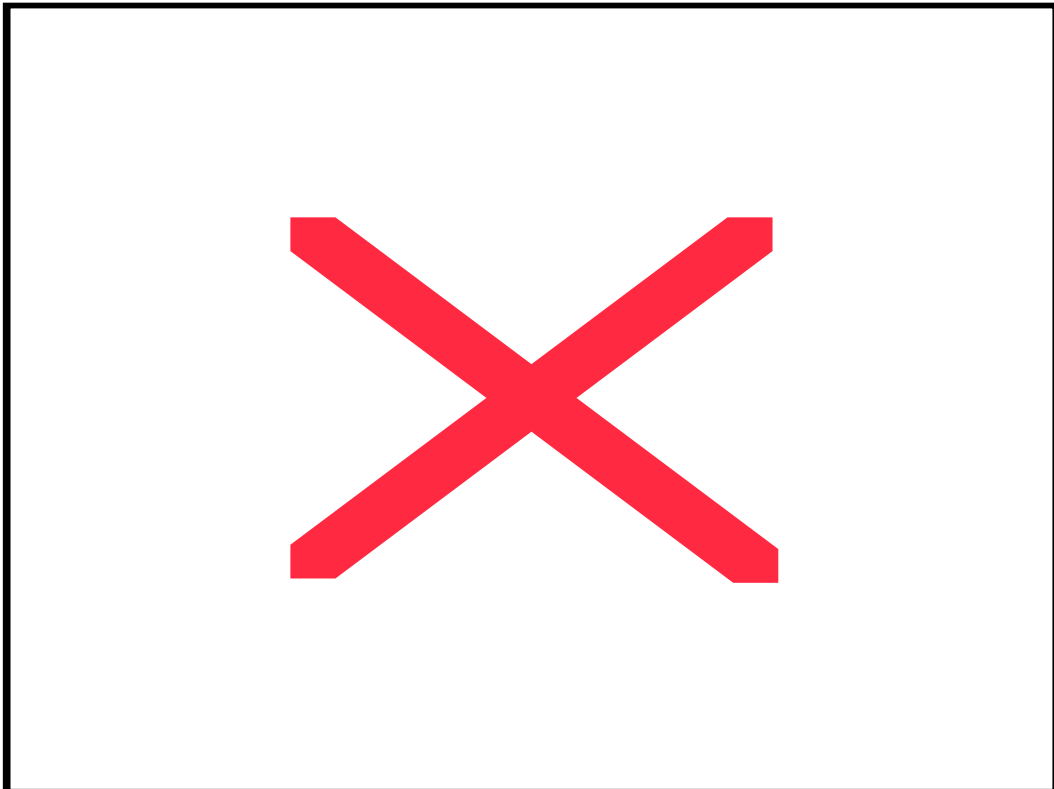


Figure 6 Nuage des points moyens des Domaines étudiés

Les deux domaines contribuent exclusivement à l'axe 1 (voir contributions absolues, Tableau 5) et sont en opposition par rapport au discours émis : la Réalité Virtuelle est plus attirée par le versant technologique et la Simulation par le versant du concret, de l'application.

	AXE1	AXE2	AXE3	AXE4
RV	-1.003	0.006	0.384	0.107
Simulateur	1.186	-0.008	-0.454	-0.126

Tableau 16 Tableau des coordonnées factorielles des domaines

	AXE1	AXE2	AXE3	AXE4
RV	2.123	1.106	0.870	0.434
Simulateur	1.075	0.873	0.547	0.719

Tableau 17 Tableau des contributions absolues des domaines aux axes

Pour affiner cette étude, nous avons constitué le nuage des points moyens réunissant les trois facteurs étudiés : Fonction, Site et Domaine.

Fonctions, Sites et Domaines

SITE	Fon/Dom	Fidélité		Image		Immersion		Interact.		Interface		Réalisme	
		RV	Simu	RV	Simu	RV	Simu	RV	Simu	RV	Simu	RV	Simu
AFPA	Form	0.44		0.94		-0.68		-0.57		-1.10		-0.84	

INRIA	Conc	0.17		0.36		1.37		0.84		1.10		1.28	
Euroco.	Form		0.16		-1.20		-0.43		-0.75		-0.26		-1.22
Euroco.	Conc	-1.09	-0.64	1.79	-0.79	0.06	-0.86	-0.40	-0.67	0.25	-0.12	0.95	-1.17
SNCF	Form		-0.97		1.35		-0.79		-0.75		-1.02		0.06
SNCF	Conc	0.15	-0.22	-0.30	0.08	-0.23	-0.63	1.63	-0.71	-1.19	0.12	-0.30	-0.27
SNCF	Ergo	-0.92	1.85	-0.57	-0.60	0.35	-0.72	1.31	-0.75	2.02	0.00	-0.43	-0.51
Paris5	Ergo	0.77	0.84	-0.75	0.56	0.54	-0.75	-0.15	-0.75	-0.58	-1.22	-0.40	1.31
Mines	Conc	0.66		-0.66		1.45		-0.27		1.05		0.53	

SITE	Fon/Dom	Réalité		Sens		Tâche		Ergonomie		Scénario	
		RV	Simu	RV	Simu	RV	Simu	RV	Simu	RV	Simu
AFPA	Form	1.10		-0.12		-0.43		-1.07		0.22	
INRIA	Conc	-0.06		1.70		-0.53		-0.38		-0.60	
Euroco.	Form		3.21		-0.95		-0.86		0.49		-0.89
Euroco.	Conc	-1.61	-0.46	1.83	0.65	-0.44	-0.54	0.26	0.35	-0.52	-0.08
SNCF	Form		0.10		0.73		-0.38		-0.85		1.08
SNCF	Conc	-0.28	-0.14	-0.45	0.33	0.30	-0.21	-0.85	0.05	1.05	0.22
SNCF	Ergo	1.08	-0.56	-0.79	0.11	0.20	-0.78	1.33	-1.07	-0.72	1.12
Paris5	Ergo	0.39	0.07	-0.51	-0.45	-0.29	-0.97	3.22	-0.20	-0.57	-0.18
Mines	Conc	-0.50		-0.13		-0.46		0.79		-0.89	

Tableau 18 Tableau des écarts réduits selon la Fonction, le Site et le Domaine

Pour faciliter l'interprétation, nous analyserons les écarts réduits positifs les plus élevés. Ainsi :

AFPA-formateur-RV, les préoccupations principales sont les images et la réalité.

INRIA-concepteur-RV, le discours est focalisé sur l'immersion, les interactions, les interfaces, le réalisme et la représentation des sens.

Eurocontrol-formateur-Simulation, le principal thème évoqué est le réalisme.

Eurocontrol-concepteur-Simulation, le discours se focalise plutôt sur les sens.

Eurocontrol-concepteur-RV, les préoccupations se situent au niveau de l'image et du réalisme.

SNCF-formateur-Simulation, les thèmes se réfèrent le plus souvent à l'image et au scénario.

SNCF-concepteur-RV, les principales évocations concernent les interactions et le scénario.

SNCF-concepteur-Simulation, la représentation des sens est la plus évoquée.

SNCF-ergonome-RV, ce sont les interactions, les interfaces, la réalité et l'ergonomie qui sont les plus présentes dans le discours.

SNCF-ergonome-Simulation, la fidélité et le scénario sont des thèmes fondamentaux.

Paris5-ergonome-RV, l'ergonomie prédomine.

Paris5-ergonome-Simulation, les principaux thèmes évoqués sont la fidélité et le réalisme.

Mines-concepteur-RV, l'immersion et les interfaces sont les plus présents dans le discours.

Bien que l'on retrouve globalement l'opposition maintenant classique entre (à gauche) le domaine de la Réalité Virtuelle et (à droite) le domaine de la Simulation, ces points moyens indiquent d'autres différences que l'on interprétera avec les coordonnées factorielles (voir Tableau 14) et les contributions absolues aux axes (voir Tableau 15).

Nous interpréterons les différentes positions sur les 2 premiers axes à l'aide des écarts réduits des points moyens (Tableau 18), des coordonnées factorielles et des contributions absolues correspondantes (Tableau 19 et Tableau 20), ainsi qu'à l'aide du Tableau 8 relatif au nuage des variables.

Sur *l'axe 1*, on trouve essentiellement une opposition entre, d'une part l'optique des concepteurs RV de l'INRIA, de l'école des Mines et d'Eurocontrol (à gauche sur le graphique), et d'autre part le point de vue des concepteurs et formateurs d' Eurocontrol en Simulation (en bas à droite).

Les concepteurs RV de l'INRIA et des Mines semblent plus favoriser l'Immersion, les Interfaces, le Réalisme et la représentation des Sens.

Les concepteurs et formateurs d'Eurocontrol en Simulation focalisent plus leur discours

sur le Scénario.

Les concepteurs en Simulation d'Eurocontrol tiennent ainsi, pour ce concerne l'importance du Scénario, proche de celui des formateurs.

Sur *l'axe 2*, on retrouve principalement les personnes qui donnent une plus grande importance à la référence au réel, à l'Ergonomie des systèmes et à la Méthodologie. Il s'agit des ergonomes de Paris 5 et de la SNCF en RV et des concepteurs/formateurs d'Eurocontrol (en bas sur le graphique). Ils sont opposés aux concepteurs RV de l'INRIA et de la SNCF et aux formateurs en simulation de la SNCF (en haut), qui tiennent un discours plus orienté sur les images, le réalisme, le scénario (domaine de la représentation de la réalité dans le système).

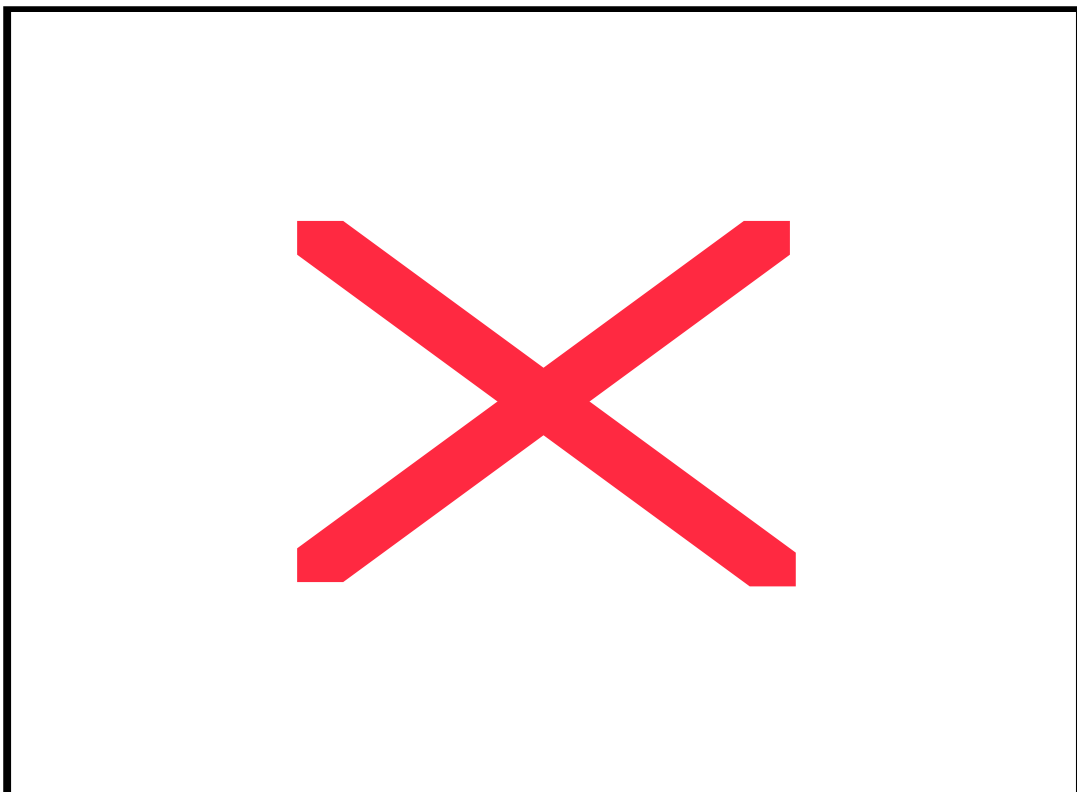


Figure 7 Nuage des points moyens constitués selon la Fonction, le Site et le Domaine Légende : En noir : le domaine de la Réalité Virtuelle et en bleu : le domaine de la Simulation

Site	Fon/Dom	AXE1		AXE2		AXE3		AXE4	
		RV	Simu	RV	Simu	RV	Simu	RV	Simu
AFPA	Form	1.316		0.407		-0.406		-1.196	
INRIA	Conc	-2.828		0.569		0.723		0.092	
Euroc.	Form		1.339		-3.050		-0.096		-0.258
Euroc.	Conc	-2.052	1.406	1.844	-0.590	-1.953	-0.833	0.177	0.598
SNCF	Form		1.586		1.882		-0.781		0.165
SNCF	Conc	1.082	0.712	0.897	0.123	1.257	-0.565	0.097	0.061
SNCF	Ergo	-0.797	1.514	-1.886	0.197	0.209	1.047	1.899	-1.704
Paris5	Ergo	-0.112	0.667	-2.713	0.403	-0.338	-0.191	0.333	-1.734
Mines	Conc	-1.667		-1.269		0.409		-0.242	

Tableau 19 Tableau des coordonnées factorielles des points moyens constitués selon la Fonction, le Site et le Domaine

		AXE1		AXE2		AXE3		AXE4	
		RV	Simu	RV	Simu	RV	Simu	RV	Simu
AFPA	Form	0.072		0.007		0.007		0.060	
INRIA	Conc	1.385		0.208		0.214		0.120	
Euroc.	Form		0.075		0.387		0.000		0.003
Euroc.	Conc	0.175	0.248	0.142	0.067	0.159	0.123	0.001	0.066
SNCF	Form		0.568		0.296		0.329		0.181
SNCF	Conc	0.150	0.070	0.159	0.114	0.470	0.049	0.076	0.223
SNCF	Ergo	0.026	0.095	0.148	0.002	0.002	0.046	0.150	0.121
Paris5	Ergo	0.001	0.019	0.307	0.007	0.005	0.002	0.005	0.125
Mines	Conc	0.314		0.135		0.014		0.023	

Tableau 20 Tableau des contributions absolues aux axes des points moyens constitués selon la Fonction, le Site et le Domaine

Sur **l'axe 3**, on retrouve l'opposition entre le discours focalisé sur la fidélité, les interactions, l'immersion, les interfaces donné plus volontiers par les concepteurs en RV de la SNCF et de l'INRIA, et le discours porté sur les images, tenu par les concepteurs d'Eurocontrol en RV et les formateurs en Simulation de la SNCF.

L'axe 4 oppose essentiellement la Tâche, l'Ergonomie (point de vue des concepteurs/formateurs en simulation et des ergonomes RV de la SNCF) à la Fidélité (ergonomes en simulation de Paris 5 et de la SNCF).

Une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) a ensuite été effectuée sur les individus, de manière à discerner les proximités et les différences les plus prépondérantes.

IV.4 Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

IV.4.1 Principes de la CAH

Les analyses hiérarchiques cherchent à représenter les individus par un ensemble de parties hiérarchiquement emboîtées. Le résultat se présente sous la forme d'un ensemble de partitions possibles plus ou moins fines. Il est possible d'obtenir une hiérarchie de partitions par deux types de méthodes : soit par une méthode *descendante*, soit par une méthode *ascendante* (CAH) qui procède par *regroupements successifs* allant des individus vers le groupe. Le principe est le suivant : on part des classes constituées par un seul individu, on agrège les classes les plus proches, puis on agrège de nouvelles classes, etc. Jusqu'à ce que les éléments soient tous regroupés en une seule classe. Ces classifications sont représentables sous forme *d'arbre* et peuvent être appréhendées via le nuage des individus, préalablement constitué à partir de l'ACP, car elles sont effectuées à partir de données centrées réduites.

IV.4.2 Résultats de la CAH sur les données

La CAH la plus pertinente pour ces données nous indique une partition en 5 classes (60% de la variance totale prise en compte). Ci-après la figure 8 représente cette partition pour les axes 1 et 2 :

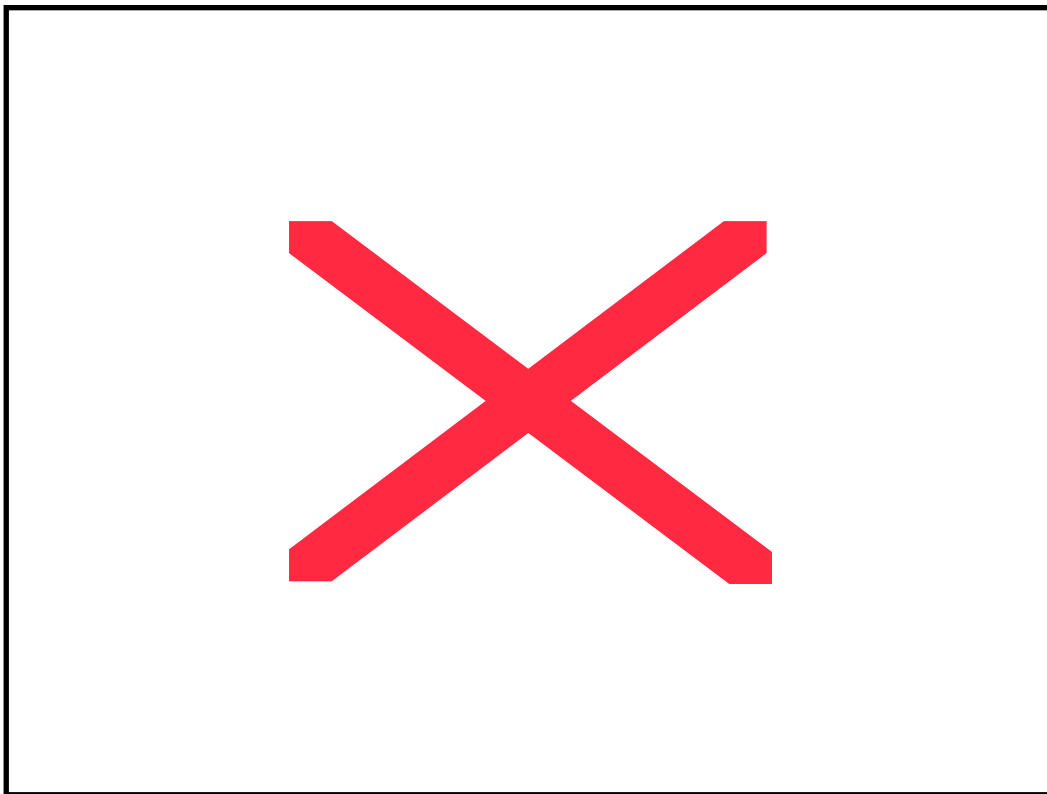


Figure 8 Représentation de la partition en 5 classes issues de la CAH et représentée dans le plan factoriel 1-2 (En bleu : les concepteurs)

On peut constater de prime abord que les sites, les fonctions et le domaine se retrouvent distribués un peu partout dans le nuage des partitions. Certains aspects font converger les avis, d'autres les font diverger, et ce quelle que soit l'appartenance à un domaine ou un site et quelle que soit la fonction exercée.

Afin de mieux comprendre ces aspects, nous avons repéré les différentes partitions par un numéro (de p1 à p5).

	FIDE	IMAG	IMME	INTN	INTF	REAM	REAT	SENS	TACH	ERGO	SCEN
p1	-0.63	0.14	-0.18	-0.24	-0.85	0.47	0.50	-0.44	2.15	-0.60	2.00
p2	0.49	-0.33	1.83	0.67	0.90	1.12	-0.15	1.46	-0.67	0.06	-0.74
p3	-0.90	2.25	-0.12	-0.09	0.45	0.85	-1.19	1.18	-0.51	-0.25	-0.54
p4	0.22	-0.76	0.27	-0.08	0.64	-0.37	1.24	-0.81	-0.31	1.32	-0.77
p5	0.17	-0.28	-0.75	-0.13	-0.49	-0.70	-0.23	-0.48	-0.10	-0.29	0.16

Tableau 21 Tableau des écarts réduits des 5 partitions

La partition p1 (en haut à droite) regroupe les personnes dont le discours est plus orienté sur la Tâche et le Scénario. Cette classe ne comprend que des personnels SNCF (concepteurs RV et Simulation et formateurs en Simulation).

La partition p2 (à gauche) associe essentiellement des concepteurs en RV (INRIA et école des Mines) Ces personnes sont plus concernées par l'immersion, les interfaces, le réalisme et la représentation des sens.

La partition p3 (en haut à gauche) regroupe les concepteurs en RV de l'INRIA et d'Eurocontrol et des formateurs SNCF. Leurs préoccupations sont plus focalisées sur la représentation des images et des sens.

La partition p4 (en bas) fait converger les concepteurs en RV des Mines, les ergonomes

en RV de la SNCF et de Paris 5 et les formateurs en Simulation d'Eurocontrol. Ils parlent surtout de référence au réel, au terrain et d'ergonomie.

La partition p5 (à droite) réunit surtout des personnes qui travaillent dans le domaine de la simulation (concepteurs SNCF, Eurocontrol, ergonomes de Paris 5) et aussi quelques personnels travaillant en RV (formateurs de l'AFPA et concepteur de la SNCF). Leur discours se trouve beaucoup plus neutre par rapport aux autres partitions, car ils évoquent tous les thèmes retenus de manière quasi-équivalente, sans prendre de position tranchée. Ils traitent les situations concrètes (formation).

IV.5 Retour à l'analyse du discours et particularités des partitions

Pour affiner l'analyse du discours effectuée et présentée au début de la partie "Méthodologie", nous avons regroupé les discours selon les partitions issues de la CAH.

Pour les 5 classes, le style de discours est le style argumentatif (locuteurs qui discutent, comparent, critiquent), et on constate une utilisation massive de verbes statifs (état, possession), déclaratifs (déclaration sur un état), de modalisations (locutions adverbiales) de négation ou d'intensité. Les joncteurs (connecteurs, conjonction de coordination) sont souvent de cause. Le mode le plus utilisé est l'indicatif et le temps, le présent. Les sujets sont ainsi bien ancrés dans la situation présente.

Toutefois, quelques détails doivent être précisés pour chaque partition :

La *Partition p1* dont le discours est orienté plutôt sur la tâche ou le scénario (Formation) a une mise en scène ancrée dans le réel (notions de possession prédominantes, qui indiquent le concret de la situation). L'analyse révèle également des notions de doute (utilisation de locutions telles que "peut-être" produites en quantité non négligeable). Les personnes utilisent également beaucoup d'adjectifs subjectifs (avis personnels sur les questions), mais chaque individu ne s'implique pas personnellement (utilisation massive du "On", forme impersonnelle). Cela semblerait indiquer une remise en cause des critères évoqués, impliquant la volonté de rechercher d'une solution meilleure pour améliorer les systèmes.

La *Partition p2*, représentative de la RV et des concepteurs, a une mise en scène prise en charge par le narrateur (utilisation importante de verbes déclaratifs). Ces personnes utilisent également beaucoup d'adjectifs subjectifs pour livrer leurs pensées et l'utilisation du pronom "on" prédomine.

La *Partition p3*, qui implique un discours centré sur la représentation des images et des sens, a une mise en scène prise en charge par le narrateur, comme la partition p2, et utilise des notions de doute comme la partition p1 (remise en cause en vue d'améliorer les situations). Ces personnes s'engagent personnellement dans le discours, puisque la mise en scène est également prise en charge par le pronom "Je". Les adjectifs subjectifs sont également produits de manière assez importante (avis personnels).

La *Partition p4*, qui représente la réalité, l'ergonomie des systèmes, a une mise en scène prise en charge par le narrateur (production de verbes déclaratifs en quantité importante), et aussi à l'aide du "Je" : les personnes n'hésitent pas à s'impliquer personnellement ; ce qui est renforcé par une production aussi importante d'adjectifs subjectifs.

La *Partition p5*, qui illustre surtout le domaine de la Simulation, a un discours ancré dans le réel et émet souvent des doutes sur les différents thèmes évoqués. Ce qui explique que cette partition reste assez indéfinie par rapport aux quatre autres, qui donnent des avis plus prononcés. Les personnes concernées sont donc bien conscientes du concret de la situation. Les thèmes les plus évoqués font partie des variables supplémentaires de l'analyse (apprenants, formation, limites, avantages, technologie, simulation).

V Conclusion-Synthèse : vers des outils d'aide à la conception

L'objectif de cette partie est de proposer des outils d'aide à la conception à partir des résultats de cette recherche.

D'une part, il s'agit de discuter et d'apporter des éléments de réponse aux questions initiales qui ont motivées ce travail. Il s'agit d'autre part de proposer des outils méthodologiques pour assister la conception des outils de formations utilisant les nouvelles technologies en général, et les technologies de réalité virtuelle en particulier.

Quelques perspectives sont finalement évoquées.

V.1 Discussion et éléments de réponses aux questions initiales

V.1.1 Y a-t-il une ou plusieurs technologies plus parfaitement adaptées pour répondre à tel besoin particulier de formation ?

L'état majoritaire des pratiques et des méthodes dans le domaine des NTFS nous incline à répondre par la négative à cette question, la bonne ou moins bonne adaptation d'une technologie nous paraissant actuellement moins liée aux propriétés des spécifications techniques qu'à des faiblesses dans les procédés et la méthode. Une technologie n'est pas réductible aux artefacts qu'elle produit dans la mesure où elle se définit également par ses procédés et ses méthodes. Elle est située, notamment en regard de la culture et des paradigmes qui la dominent à un instant donné, mais également en regard de l'expérience accumulées aux cours des projets précédemment réalisés, si l'on considère une équipe ou un concepteur particuliers.

Les résultats de l'étude par entretien nous font suggérer les réflexions suivantes concernant ce questionnement de la technologie par rapport à son aptitude à répondre à des besoins exprimés.

D'une part, il nous semble que la « jeunesse » d'une technologie se traduit en moyenne par une focalisation accentuée sur les solutions et les spécifications techniques : ce point trouve une illustration dans l'opposition observée sur l'axe 1 entre les deux domaines technologiques que sont la simulation et la réalité virtuelle. Le domaine de la réalité virtuelle constitue une technologie récente et par conséquent peu mature d'un point de vue strictement technique. A l'inverse, une technologie plus « ancienne » se focalisera en moyenne sur les problèmes à traiter dans le domaine d'application (association forte entre la problématique de la formation et le domaine de la simulation). Cette opposition entre un domaine technologique jeune et plus ancien est en partie confondue avec le métier « conception » ou au contraire « formation » des concepteurs. On peut souligner le statut intermédiaire du point de vue des ergonomes mis en valeur dans cette étude : l'axe 1 oppose clairement les domaines technologiques et les deux métiers « conception » et « formation », alors que le métier « ergonome » se trouve plutôt représenté sur l'axe 2 (fidélité, terrain et référence au réel, ergonomie, utilisateurs et technologie) dans une position intermédiaire.

D'autre part, cette représentation moyenne associée à un domaine technologique doit être nuancée par les résultats obtenus dans nos analyses complémentaires (notamment les résultats de la partition par classification ascendante hiérarchique), dans la mesure où elle n'est pas systématiquement reproduite par tous les concepteurs de l'un ou l'autre des domaines technologiques. D'autres facteurs interviennent, tels que le « métier » du concepteur, le domaine d'application (transport ferroviaire, contrôle aérien,

etc.) et enfin l'expérience en termes de projets menés (l'effet de ce dernier facteur serait à approfondir et valider).

Notre revue a souligné en général le manque de méthode et d'approche centrées sur des besoins réels, la faible prise en compte de l'activité d'apprentissage, l'absence d'hypothèse précise en termes de bénéfices et de critères de conception, et finalement le peu d'évaluation rigoureuse. Nous soulignons, en particulier, que des travaux parmi les plus récents sur ces différents plans, visent justement à éliminer ces points faibles :

- Projets initiés à partir de besoins réels de formation, ou intégrant la réponse à un besoin réel de formation associé à l'analyse de la situation existante, afin de maximiser la chance d'aboutir à un développement technique et pédagogique directement valorisable sur le terrain, dans l'entreprise.
- Méthodes et démarches outillées centrées sur les utilisateurs (formateurs et apprenants) et les situations d'usage, plutôt que focalisées uniquement sur la spécification technique du produit.
- Equipes de conception pluridisciplinaires où l'expertise et les expériences se complètent pour enrichir le point de vue développé à l'intérieur du projet : solutions techniques, problématique de formation, terrain, utilisation et ergonomie.

Les limites purement techniques évoluent ; elles peuvent être identifiées et les solutions anticipées dès lors qu'il y a formulation d'hypothèses précises sur la situation d'usage, et sur les performances attendues. Les limites techniques sont d'ailleurs perçues par l'ensemble des intervenants dans ce type de projet, comme le suggèrent les résultats de l'étude présentée dans la partie précédente. Nous avons montré, en effet, que les avis des personnes interrogées pouvaient converger sur certains aspects, dont les limites, quelle que soit la profession exercée (formateur, concepteur, ergonomiste), quel que soit le lieu d'exercice (AFPA, Eurocontrol, INRIA, SNCF, Paris 5 ou l'école des Mines), ou le domaine étudié (Réalité Virtuelle ou Simulation). Rappelons que l'ergonomie des systèmes constituait aussi une préoccupation partagée, et pas seulement pour les ergonomes ! En effet, quel que soit le domaine, le système doit être facile à utiliser et aussi ergonomique que possible, tant pour les outils manipulés lors des tâches quotidiennes que pour les différents systèmes qui sont censés les reproduire.

Si les limites d'une technologie considérée doivent être prises en compte, leur poids ne devrait pas pour autant être surestimé dans la mesure où l'expérience personnelle dans les projets, la référence à une méthodologie outillée, la constitution d'une équipe projet autour de compétences complémentaires semblent pouvoir y pallier. Ces différents moyens conduiraient ainsi à intégrer un point de vue « formation » dans la conception d'Environnements Virtuels et de Simulation pour la formation, lequel apparaît construit essentiellement autour de la notion de scénario. Comme il a été relaté à plusieurs reprises durant les entretiens, notamment pour ce qui concerne la formation sur simulateurs, l'essentiel semble surtout concerner la reproduction de certains points de repères « naturels », même si le réalisme ou la reproduction perceptive ne sont pas parfaits. De ce fait, l'immersion n'est pas centrale au sens où les personnes ont conscience qu'elles ne travaillent pas sur une situation réelle, mais sur une situation simulée. Tous les entretiens font également référence à des anecdotes indiquant qu'en général les personnes "jouent le jeu", si le scénario est suffisamment réaliste et mettent donc en œuvre des procédures appropriées, même si le degré d'immersion ne semble pas très important. Ces mêmes réflexions ont été recueillies aussi bien pour la SNCF que pour Eurocontrol. Ces deux structures, en effet, accordent une importance toute particulière à la construction du scénario, à la plausibilité des faits. L'essentiel est, pour la SNCF, que les opérateurs reconnaissent aisément la ligne qu'ils ont l'habitude de pratiquer et que le scénario mis en place soit cohérent par rapport à la pratique (tant au

niveau de la conformité des quais qu'au niveau de la durée du voyage), et ce même si les détails de l'image ne revêtent pas un caractère graphique très élaboré. Pour Eurocontrol, les mêmes remarques ont été recueillies notamment pour ce qui concerne la plausibilité des faits ; par exemple, si les contrôleurs ont à gérer des situations qu'ils n'ont jamais à traiter dans leurs tâches quotidiennes ou des situations "invraisemblables" par rapport à la réalité, la simulation ne peut pas être effective. Les opérateurs n'ont effectivement pas la possibilité de reconnaître leurs situations réelles (présentation, par exemple, d'avions "en grappe") et ne peuvent apprécier la situation de simulation à sa juste valeur ; ce qui implique souvent de la déconcentration de leur part et donc un degré d'immersion très faible.

Enfin, l'analyse des résultats actuels principaux fait suggérer deux aspects apparaissant partiellement robustes dans l'effet des nouvelles technologies pour la formation. En premier, les technologies dites "nouvelles" ont un effet favorable sur la motivation et l'engagement des sujets amenés à les utiliser. Cet aspect de motivation peut être intéressant à soutenir afin d'améliorer l'efficacité de certaines situations traditionnellement problématiques sur ce plan, comme par exemple l'auto-formation. Deuxièmement, les défauts d'utilisabilité et d'utilité, voire de pertinence du contenu, peuvent avoir un impact très négatif.

V.1.2 Y a-t-il des contenus pour lesquels une technologie en particulier ne peut pas être utilisée ?

De façon récurrente, il est suggéré l'existence d'une interaction entre la méthode, l'organisation du matériel et le domaine cible de la formation ; le seul questionnement du contenu et de la technologie ne peut, de ce fait, être analysé directement.

Ainsi, il nous semble que les aspects problématiques d'une technologie résident moins dans sa maturité technique que dans les points suivants :

- définition floue des objectifs et du projet, représentation non partagée des buts en termes de situation à atteindre ;
- attentes infondées des demandeurs/ utilisateurs futurs, reposant sur la méconnaissance ou sur une représentation naïve de la technologie et de ses bénéfices (ce qui peut se traduire par des attitudes positives aussi bien que négatives dans le cours d'un projet et de sa négociation). Nous soulignerons ici l'intérêt du prototypage /démonstrateur qui permet certes d'évaluer la faisabilité d'un projet de développement du point de vue de l'équipe projet, mais qui permet également de faire évoluer ces représentations naïves chez les demandeurs, les décideurs et les utilisateurs potentiels de l'outil. C'est le fait d'entrevoir concrètement, qui souvent débloque des situations frileuses en termes de développement pour ces nouveaux outils (Hörtner et al., 2001).
- éclairage fort sur les potentialités des nouvelles technologies, qui tend à occulter les exigences physiques associées à ces nouveaux "postes de formation". Les contraintes physiques doivent être prises en compte (Hinckley et al., 1994), comme dans tout processus d'informatisation du travail ou des loisirs personnels, afin de minimiser les risques de Troubles Musculo-Squelettiques (TMS), par exemple.

V.1.3 Le peu d'efficacité d'un outil relève-t-il d'un mauvais choix de technologie, d'un problème de méthode, ou d'une mauvaise interface ?

Cette question est récurrente aussi bien chez le lecteur qui tente d'analyser les résultats dans la littérature scientifique, que chez les concepteurs qui veulent évaluer une solution. Pour minimiser les risques de résultats liés à un déficit en termes de contenu, il nous semble intéressant de :

- Former des équipes pluridisciplinaires comprenant formateur et/ou spécialiste du domaine.
- Formaliser à l'aide d'outils et de documents les domaines non partagés par l'ensemble des acteurs de la conception, comme par exemple celui de l'activité des apprenants, des formateurs etc.
- Opérer des prétests du matériel, avec éventuellement une démarche itérative pour obtenir des conditions d'évaluation où il y ait à peu près la même information explicite ou implicite, et où il y ait effectivement mise en place d'un apprentissage avec le matériel proposé, les consignes et dans la situation de formation définie.

D'autre part, l'interaction entre ces facteurs est en soi intéressante, et devrait faire partie des caractéristiques précisées (voire mesurées) dans toute situation d'étude.

V.1.4 Comment peut-on évaluer ou améliorer un outil de formation existant, avec quels moyens, et pour quel résultat ? etc.

La difficulté associée à l'évaluation dans le domaine des technologies d'apprentissage est discutée rapidement ailleurs (cf p 16). Il nous semble que la démarche de l'ergonomie dans les technologies et la formation professionnelle constitue un premier élément de réponse sur le « comment évaluer ou améliorer » un outil de formation existant (cf p 3). Les outils et recommandations proposées à la suite constituent également des pistes pour l'obtention de ces objectifs. Dans le cadre de projets comme ceux développés à la SNCF, on peut souligner le caractère évolutif de la revue des résultats proposée, laquelle pourra être enrichie à la fois par un processus de veille interne, et à la fois par l'ajout des résultats d'études à venir.

V.2 Outils méthodologiques pour assister la conception

Dans cette partie, nous proposons d'outiller certaines phases de la conception d'outils de formation au moyen de synthèses des questions ou éléments à prendre en compte.

V.2.1 Préciser la situation et l'outil

La situation de formation projetée avec les Nouvelles Technologies de Formation

Il semble important de cibler et dimensionner la situation cible de formation dans le cadre d'un projet de conception dans toutes ses dimensions, et non uniquement au travers de quelques unes des spécifications techniques précises de l'artefact. Parmi les dimensions, nous avons noté :

- spécification de la situation cible de formation, dans son ensemble, et non uniquement centrée sur le (ou les) outil(s) projetés : dimension socio-pédagogique (auto-formation, tutorat, etc. voir Tableau 22 ; explication et discussion données en 13), activités didactiques projetées, organisation et logistique impliquée, matériel, etc.
- les outils et les fonctionnalités associées qui sont envisagés pour outiller la situation décrite ;
- les modifications et investissements envisagés sur l'existant (humain, organisation, matériel) pour intégrer en pratique le projet sur le terrain.

Appellation "classique"	Cadre social /pairs	Proximité spatiale	Proximité temporelle	Cadre social / acteurs pédagogique	Proximité spatiale	Proximité temporelle
Autoformation	Individuel	Local	Simultané	Autonome/ Tuteur/ Expert/ Administration	Local/ Distribué	Simultané/ Désynchronisé
Binôme	Binôme	Local/ Distribué	Simultané/ Désynchronisé	Autonome/ Tuteur/ Expert/ Administration	Local/ Distribué	Simultané/ Désynchronisé
Travail en groupe/ équipe	Petit groupe	Local/ Distribué	Simultané/ Désynchronisé	Autonome/ Tuteur/ Expert/ Administration	Local/ Distribué	Simultané/ Désynchronisé
Enseignement de masse	Grand groupe	Local/ Distribué	Simultané/ Désynchronisé	Autonome/ Tuteur/ Expert/ Administration	Local/ Distribué	Simultané/ Désynchronisé

Tableau 22 Caractérisation socio-pédagogique de la situation de formation projetée

L'outil

Pour faciliter le développement (ou l'évaluation le cas échéant) d'un outil, les points suivants nous apparaissent à préciser, y compris s'il s'avèrait nécessaire de les modifier en cours de projet ; ces points peuvent être compris comme des tâches à réaliser (présentées ici dans un ordre arbitraire) :

- analyse, description et formalisation de la tâche, des compétences nécessaires et plus généralement du travail à apprendre. Les outils de l'analyse du travail, de même que l'analyse de situations de formations existantes peuvent concourir à enrichir ce point.
- formatage du projet envisagé sur les objectifs (outil, environnement, envergure organisationnelle), les moyens financiers, humains et matériels.
- rendre explicite très tôt les hypothèses sur les bénéfices/avantages attendus en termes d'apprentissage d'une part (voir la synthèse en Tableau 23) et sur le modèle de l'apprentissage ; dans le domaine de la formation avec les EV, les modèles les plus courants (cf. discussion p 24) sont :
 1. exposition « simple » à un contenu, une situation
 2. répétition de situations de pratique
 3. imitation de l'expert
 4. observation en temps réel des conséquences de ses propres actions
- adopter une approche centrée-utilisateur, en considérant formateur et apprenant, tâches et situations d'usage.

Motivation : outils, technologie, imagination etc.
Immersion :
Réalisme
3D
Adaptation statique/dynamique du niveau de fidélité
Animation dynamique
Interactivité
Perspectives /points de vue multiple

Tableau 23 récapitulatif des hypothèses sur l'utilisation des EVs

V.2.2 L'accompagnement du projet

Plusieurs dimensions coexistent dans un projet de conception d'outils de formation utilisant les nouvelles technologies. La recherche exposée au chapitre précédent suggère que, suivant la technologie d'origine et suivant le "métier" représenté, les points de vue diffèrent entre les différents concepteurs. Pour faire le lien entre ces points de vue, et enrichir systématiquement la coopération entre les différents acteurs, nous proposons de lister un certain nombre de synthèses des questions principales portées par les domaines.

La première synthèse concerne le point de vue orienté-formation sur les technologies (Tableau 24). Elle peut être utile pour faire intégrer et discuter de fonctionnalités centrées sur la formation dès les phases initiales de spécification projet. Par exemple, ces éléments sont encore très en retrait dans les spécifications actuelles des EV pour la formation ; un constat similaire peut être fait sur de nombreux outils de visualisation et d'apprentissage.

	Propriétés envisagées / aspects à questionner
Fonctions informatiques	Individualisation du contenu et du parcours
	Données /performances enregistrées, présentation, synthèse des comportements/résultats
	Autres utilisations/fonctions
fonctions didactiques	Objectifs pédagogiques explicites, précis, pertinents
	Réversibilité des actions
	Rejeu des situations
	Gel de situation
Statut de l'erreur	Gestion, vision des conséquences, exploitation didactique
Catalogue des situations disponibles	Contenu, développement, suivi, maintenance
Contextes et scénarios	Définir et évaluer leur validité écologique

d'usage	
Impact au delà de l'outil	Conséquences en termes d'organisation, de matériel, de postes etc.

Tableau 24 Quelques aspects à questionner pour la conception/évaluation d'un outil

L'objectif de la synthèse suivante est de préciser les réponses en termes de méthodes et /ou de choix de conception apportées aux problèmes principaux associés à l'usage d'EV pour la formation (voir Tableau 25). Si les derniers sont propres au domaine de la réalité virtuelle, les trois premiers sont suffisamment généraux pour être valables dans d'autres domaines tels que les Environnements interactifs d'apprentissage, les didacticiels et autres hypertextes pour l'apprentissage.

Utilisabilité
Désorientation
Fatigues visuelles et physiques
Mal du simulateur
Autres aspects médicaux/ hygiène

Tableau 25 récapitulatif des principaux problèmes liés à l'usage d'EV

V.2.3 L'évaluation

Le lien entre expérimentation /évaluation et les situations cibles d'implantation dans des situations de formation réelle devrait être identifiés clairement, notamment pour en évaluer les limites de transférabilité.

La simplification des situations expérimentales, comme le maintien de conditions expérimentales trop strictes peuvent rendre difficile toute conclusion sur l'efficacité pratique et la pérenité d'un outil / d'une technologie dans le domaine de la formation. Souvent en effet, les consignes ou contraintes posées par l'expérimentation vont à l'encontre des comportements « naturels », et il n'est pas clair alors si les résultats obtenus avec de telles contraintes ont réellement une chance d'être obtenus sur le terrain. Par exemple, les méthodologies issues de l'expérimentation forcent souvent l'apprenant à un examen standardisé du matériel ; dans ce contexte, si une supériorité de l'un ou l'autre des outils est rapporté, cette supériorité ne sera pas forcément transférée dans les situations d'autoformation où l'on sait que la motivation et le parcours entier d'un document ne se fera pas forcément de la même façon. Nous retiendrons, pour améliorer la transférabilité des résultats au terrain, qu'il est souhaitable :

- d'opérer la distinction explicite entre des objectifs d'évaluation poursuivis aux différentes étapes d'un projet (utilisabilité vs efficacité vs adaptation au terrain...)
- de favoriser l'approche in situ ou proche de la situation d'usage envisagée (sujets, contexte, etc.).
- d'avoir recours à des analyses fines des comportements et usages, sur des petits groupes pour pallier au « cout » relatif de cette méthode par rapport à des indicateurs de performance plus simples à recueillir tels que temps, nombre d'erreurs et jugements subjectifs. Il semble en effet que les verrous ne soient pas toujours associés à une caractéristique de l'interface, d'où la nécessité de pouvoir formuler d'autres hypothèses sur la base d'observables objectivables.

- de disposer d'outils dans leur version opérationnelle pour l'évaluation avec les utilisateurs. L'évaluation d'outils existants, comme l'intégration de l'ergonomie dans la démarche de conception fondée sur l'analyse de performances et de comportements d'utilisateurs reposent en effet sur le postulat - souvent peu visible de l'extérieur de l'ergonomie - que l'artefact ou son prototype sont opérationnels et exempts de défauts de fiabilité qui en obèrent la simple utilisation.
- de définir des dialogues et interfaces optimaux en regard du paradigme d'interaction et de la situation d'usage, avant d'aborder l'évaluation de l'efficacité et notamment de l'apprentissage chez les utilisateurs.
- de planifier une évaluation des effets sur le long termes, en même temps que constitution d'un retour d'expériences.

V.3 Perspectives

Les critères classiques de l'ergonomie des interfaces ne s'appliquent pas de façon directe dès lors qu'il s'agit d'un outil médiateur d'un contenu à apprendre. Une raison théorique est qu'ils ont été essentiellement développés dans le contexte de situations d'interaction entre un utilisateur, expert de sa tâche, et un système, et non dans des situations d'apprentissage où le problème est la construction progressive de compétences expertes initialement absentes. Des résultats empiriques concernant l'usage de paradigmes d'interaction réputés plus adaptés suggèrent aussi de reconsidérer ces critères et d'entreprendre d'autres validations ; par exemple, la manipulation directe ou la visualisation de tendances sous la forme d'animations graphiques n'engendrent pas systématiquement de meilleurs résultats en termes de rétention ou de compréhension. Il s'agit là d'une piste d'étude à exploiter de façon urgente dans le domaine des technologies pour la formation et l'apprentissage.

L'introduction du geste et du mouvement dans l'interaction amène de nouvelles questions à traiter en ergonomie. Parmi celles-ci, le problème du référentiel spatial s'avère crucial . Les questions sont en particulier 1) quelle est la référence la plus naturelle/tâche ; 2) quelle est celle qui est spontanément utilisée et 3) quels sont les éléments (notamment de l'interface) qui peuvent suggérer le choix de la meilleure référence pour l'utilisateur. Le couplage des modalités sensorielles est également un objet d'étude déjà important sur le plan des outils d'interaction ; il constitue une véritable "aventure" à entreprendre pour découvrir en quoi le travail sur les modalités sensorielles peut engendrer de nouvelles méthodes d'acquisition des compétences si l'on se détache d'un paradigme de la simple recopie/transduction des informations modalitaires. Il nous semble qu'il y a aujourd'hui, dans le domaine de l'interaction homme machine, une certaine tendance à penser l'utilisateur comme un sujet qui "somme" plus ou moins en parallèle de l'information traitée et interprétée de façon indépendante par l'intermédiaire de ses sous systèmes perceptifs (vision, audition, kinesthésie...). On peut noter qu'il en est de même en ce qui concerne les sorties : par exemple dans l'approche traditionnelle de la commande multimodale, l'hypothèse de travail est bien qu'il y a émission de la même information sémantique (redondance) ou bien émission d'unités d'information complémentaires (cas de la désignation vocale d'un objet couplé à un geste codant l'action à appliquer.

Plus généralement, les travaux dans le domaine des technologies de simulation, les environnements virtuels, etc. gagnent à s'appuyer beaucoup plus fortement sur la complémentarité entre les différents acteurs du domaine. Il est intéressant de souligner au passage, que des technologies très nouvelles comme la réalité virtuelle semblent avoir intégré cette idée à la fois plus rapidement, et à un niveau plus important, que ce qui a pu être observé dans d'autres technologies plus traditionnelles du monde informatique.

VI Références bibliographiques des parties II & III

- Abdat, L., & Madaule, F. (1993). *Hypertextes, hypermedias, EAO : description, utilisation et problèmes posés* (RR MASI 93-06): Institut Blaise Pascal.
- Adams, N., & Lang, L. (1995, may 1995). VR improves Motorola Training Program. *AI Expert*, 13-14.
- Aubert, S. (1999). *Présentation de l'histoire de la formation des peintres*. Paper presented at the Actes de journées de Bordeaux sur la pratique de l'ergonomie, Bordeaux.
- Barab, S. A., Hay, K. E., Barnett, M., & Squire, K. (2001). Constructing virtual worlds: tracing the historical development of learner practices. *Cognition and instruction*, 19(1), 47-94.
- Bazin, J. M., & Brisson, R. (1998). *Utilisation d'un visio-amphi : bilan de trois années d'expérimentation*. Paper presented at the actes de NTICF'98 (Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication dans la Formation), Rouen, 18-20 Novembre 1998.
- Bétrancourt, M., & Tversky, B. (2000). Effect of computer animation on user's performance: a review. *Le travail humain*, 63(4), 311-329.
- Bisseret, A., & Enard, C. (1969-1970). Problème de la structuration de l'apprentissage d'un travail complexe : une méthode de formation par interaction constantes des unités programmées. *Bulletin de Psychologie*, 23, 632-648.
- Bisseret, A., Sebillotte, S., & Falzon, P. (1999). *Techniques pratiques pour l'étude des activités expertes*. Toulouse: Octares éditions.
- Bloch, H., Chemama, R., Gallo, A., Leconte, P., Le Ny, J.-F., Postel, J., Moscovici, S., Reuchlin, M., & Vurpillot, E. (Eds.). (1991). *Grand Dictionnaire de la psychologie*. Paris: Larousse.
- Bobick, A. F., Intille, S. S., Davis, J. W., Baird, F., Pinhanez, C. S., Campbell, L. W., Ivanov, Y. A., Schütte, A., & Wilson, A. (1999). The KidsRoom: a perceptually-Based Interactive and Immersive Stroy Environment. *Presence*, 8(4), 369-393.
- Boling, N. C., & Robinson, D. H. (1999). Individual study Interactive multimedia, or cooperative learning which activity best supplements lecture-based distance education? *Journal of educational psychology*, 91(1), 169-174.
- Bricken, M., & Byrne, C. M. (1992). *Summer Students in virtual Reality : a pilot study on Educational Applications of Virtual Reality* (Rapport du HITL R-92-1): Université de Washington.
- Brown, D. J., Mikropoulos, T. A., & Kerr, S. J. (1996). A virtual laser Physics laboratory. *VR in the schools*, 2(3), 2-8.
- Bruillard, E. (1997). *Les machines à enseigner*. Paris: édition Hermès.
- Burdea, G., & Coiffet, P. (1993). *La réalité virtuelle*: Hermès science.
- Burkhardt, J.-M., Lourdeaux, D., & Fuchs, P. (1999). *Conception d'un système de RV pour la formation des ADC aux opérations en milieu ferroviaire*. Paper presented at the Journées Réalité Virtuelle et Cognition, Paris, 14-15 décembre 1999.
- Burkhardt, J.-M., Michel, G., Ronca, L., & Sperandio, J.-C. (1998). *L'apport de l'ergonomie aux nouvelles technologies éducatives : la formation médicale virtuelle*. Paper presented at the actes de NTICF'98 (Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication dans la Formation), Rouen, 18-20 Novembre 1998.
- Burkhardt, J.-M., & Sperandio, J.-C. (à paraître). Ergonomie et conception informatique. In P. Falzon (Ed.), *Traité d'ergonomie*: Presses Universitaires de France.
- Byrne, C. M. (1996). *Water on Tap: the use of virtual reality as an educational Tool*. Unpublished PhD. Dissertation, Department of Industrial Engineering, Washington university, Seattle.

- Bystrom, K.-E., & Barfield, W. (1999). Collaborative task performance for learning using a virtual environment. *Presence*, 8(4), 435-448.
- Cadoz, C. (1994a). Le geste canal de la communication homme/machine. La communication instrumentale. *Technique et science informatiques*, 13, 31-61.
- Cadoz, C. (1994b). *Les réalités virtuelles*: Flammarion.
- Caro, S., & Bisseret, A. (1997). Etude expérimentale de l'usage des organisateurs paralinguistiques de mise en retrait dans les documents électroniques. *Le travail humain*, 60(4), 409-437.
- Chatigny, C., & Vézina, N. (1995). Analyse du travail et apprentissage d'une tâche complexe; étude de l'affilage du couteau dans un abattoir. *Le Travail Humain*, 58(3), 229-252.
- Chi, M. T. H., Bassok, M., Lewis, M. W., Reimann, P., & Glaser, R. (1989). Self-Explanations : How Students Study and Use Examples in Learning to Solve Problems. *Cognitive Science*, 13, 145-182.
- Coiffet, P. (1997). *Les techniques de la réalité virtuelle*. Paper presented at the Hypermédias, éducation et formation : nouvelles frontières, IUFM de Créteil.
- Cromby, J., & et al. (1996). *Successful transfer to the real world of skills practised in a virtual environment by students with severe learning difficulties*. Paper presented at the Proceedings of the first European Conference on Disability, Virtual Reality and Associated technologies, July 1996, Maidenhead Berkshire U.K.
- Cuny, X., & Hoc, J.-M. (1974). Les intermédiaires graphiques dans le travail : principes de caractérisation des codes. *Le travail humain*, 37(2), 213-228.
- Davies, S. P., & Castell, A. M. (1992). *Doing Design and describing it : accounting for divergent Perspectives in Software Design*. Paper presented at the 5th Workshop of the Psychology of Programming Interest Group, Paris.
- Dede, C., Salzman, M. C., & Loftin, R. B. (1996). *ScienceSpace : research on using virtual reality to enhance science education*. Paper presented at the proceedings ED-MEDIA 96, Boston.
- Derycke, A. C., & D'halluin, C. (1995). Co-operative learning in the distance education of adults: why, how and first results from the Co-Learn Project. In B. Collis & G. Davies (Eds.), *Innovative adult learning with innovative technologies* (pp. 129-136). Amsterdam: Elsevier.
- Draper, J. V., Kaber, D. B., & Usher, J. M. (1998). Telepresence. *Human Factors*, 40(3), 354-375.
- Drouin, A., tonnoir, S., & Krus, M. (1999). *Recherche d'indicateurs de perception visuelle pour optimiser la facettisation de données numériques*. Paper presented at the IHM 99.
- Dubois, M. (1999). *Etudes expérimentales sur la conception multimodale de dispositifs visuels : le cas d'un atelier de production*. Paper presented at the actes du XXXIV ème congrès de la SELF, 15-17 septembre 1999.
- Durey, D. (1960). Formation professionnelle fondée sur l'analyse du travail. La formation des mécanographes. *Psychologie Française*, 5(3), 187-212.
- Eberts, R. E. (1997). Computer-based instruction. In M. Helander & T. K. Landauer & P. Prabhu (Eds.), *Handbook of Human-Computer Interaction* (pp. 825-847): Elsevier Science.
- Ellis, S. R., Begault, D. R., & Wenzel, E. M. (1997). Virtual environment as Human-Computer Interaction. In M. Helander & T. K. Landauer & P. Prabhu (Eds.), *Handbook of Human-Computer Interaction* (pp. 163-202): Elsevier Science.
- Fencott, C. (1999). *Towards a design methodology for virtual environments*. Paper presented at the User-centred design and implementation of virtual environments, York, england 1999.
- Frejus, M. (1997). *Faiblesse des systèmes de réalité virtuelle et nécessité d'une conception centrée-utilisateur(s)*. Paper presented at the Interface 97, Montpellier.

- Frejus, M. (1998). *Evaluation of a virtual environment-based training tool through trainer-trainees interaction analysis*. Paper presented at the ECCE-9, University of Limerick, Ireland August 24-26.
- Fréjus, M. (1998). *La démarche ergonomique dans la conception et l'évaluation d'un système de formation à base d'environnements virtuels*. Paper presented at the actes de NTICF'98 (Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication dans la Formation, Rouen, 18-20 Novembre 1998).
- Fréjus, M. (1999). *Analyser l'activité d'explication pour concevoir en terme d'aide : application à la formation et à la négociation commerciale*. Unpublished Thèse de doctorat en Psychologie Cognitive mention Ergonomie, Université Paris 5, Paris.
- Frejus, M., & Drouin, A. (1996). *Réalité virtuelle et processus cognitifs : état de l'art et perspectives en formation* (Rapport technique HI-52/96/020): EDF -Direction des études et recherches.
- Frejus, M., Drouin, A., Thibault, G., & Schmid, A. (1997). *Conception de systèmes de réalité virtuelle pour la formation d'agents de maintenance*. Paper presented at the XXXII ème congrès de la SELF, Lyon 1997.
- Fuchs, P. (1996). *Les interfaces de la réalité virtuelle*: Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris.
- Fuchs, P., Nashashibi, F., & Lourdeaux, D. (1999). *A theoretical approach of the design and evaluation of a virtual reality device*. Paper presented at the Virtual reality and prototyping", premières rencontres internationales de la réalité virtuelle de Laval, Laval, juin 1999.
- Gaillard, I. (1997). *Synthèse des communications du thème 2 : Apport de l'ergonomie à la formation des opérateurs concernés par les transformations des activités et du travail*. Paper presented at the XXXII ème congrès de la SELF, Lyon, 17-19 septembre 1997.
- Ganier, F., Gombert, J.-E., & Fayol, M. (2000). Effet du format de présentation des instructions sur l'apprentissage de procédures à l'aide de documents techniques. *Le travail humain*, 63(2), 121-152.
- Gay, E. (1994). Is virtual reality a good teaching tool? *Virtual Reality special report, Winter*, 51-59.
- Gillet, B. (1973). *Améliorer la formation professionnelle par l'étude du travail*. Paris: Les éditions d'organisation.
- Goguelin, P. (1987). *La formation animation : une vocation*. Paris: ESF.
- Grandbastien, M. (1993). *New educational technologies cannot be fully intergrated in existing educational systems* (Rapport de recherche CRIN -93 R 328): Centre de recherche en informatique de Nancy.
- Grau, J.-Y., Doireau, P., & Poisson, R. (1998). Conception et usage de la simulation. *Le travail humain*, 61(4), 361-385.
- Grumbach, A., & Richard, N. (Eds.). (1999). *Journées Réalité Virtuelle et Cognition, Paris, 14-15 décembre 1999*. Paris: ENST.
- Guiard, Y. (1987). Asymmetric division of labor in human skilled bimanual action: the kinematic chain as a model. *The journal of motor behavior*, 19(4), 486-517.
- Guttormsen Schär, S., Stoll, F., & Krueger, H. (1997). The effect of the interface on learning style in a simulation-based learning situation. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 9(3), 235-253.
- Hinckley, K., Paush, R., Goble, J. C., & Kassel, N. F. (1994). *A survey of design issues in spatial input*. Paper presented at the UIST'94, Marina del Rey, California November 2-4 1994.
- Hörtner, H., Maresh, P., Lindenger, C., Pomberger, G., & Pinger, H. (2001). *3D Simulation of Industrial Production processes in a virtual Continuous casting environment*. Paper presented at the Virtual Reality International Conference VRIC 2001, 16-18 Mai 2001, Laval France.

- Hu, O., Trigano, P., & Crozat, S. (1998). *EMPI : une méthode pour l'évaluation du multimédia pédagogique interactif*. Paper presented at the actes de NTICF'98 (Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication dans la Formation), Rouen, 18-20 Novembre 1998.
- Joab, M., & Gouardères, G. (Eds.). (1999). *Simulation et formation professionnelle dans l'industrie* (Vol. 6 (1)). Paris: Hermes sciences.
- John, B. E., & Kieras, D. E. (1996). The GOMS family of user interface analysis techniques: comparison and contrast. *ACM transactions on computer-human interaction*, 3(4), 320-351.
- Johnson, A., Moher, T., Ohlsson, S., & Leigh, J. (2001). *Exploring multiple representations in elementary school science education*. Paper presented at the IEEE Virtual Reality Conference, Yokohama, Japan 13-17 march 2001.
- Johnson, L., Rickel, J., Stiles, R., & Muro, A. (1999). Integrating Pedagogical Agents into Virtual Environments. *Presence*, 7(6).
- Jullien, Y., Defrance, C., & Nugues, P. (1999). *Principes pour une réalité virtuelle à visée thérapeutique : application aux troubles du comportement alimentaire*. Paper presented at the Journées Réalité Virtuelle et Cognition, Paris, 14-15 décembre 1999.
- Kabbash, P., & Buxton, W. (1995). *The "prince" Technique: Fitts' law and selection using area cursors*. Paper presented at the CHI'95 Mosaic of creativity, May 7-11 1995.
- Kabbash, P., Buxton, W., & Sellen, A. (1994). *Two-handed input in a compound task*. Paper presented at the actes de CHI 94.
- Kaur, K., Sutcliffe, A., & Maiden, N. (1999). *A design advice tool presenting usability guidance for virtual environments*. Paper presented at the User-centred design and implementation of virtual environments, York, england 1999.
- Kerzel, D. (2001). Visual short-term memory is influenced by haptic perception. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 27(4), 1101-1109.
- Kozak, J. J., Hancock, P. A., Arthur, E., & Chrysler, S. (1993). Transfer of training from virtual reality. *Ergonomics*, 36(7), 777-784.
- Le Ny, J.-F., & Denhière, G. (1974). Le rôle du sentiment de savoir dans un apprentissage de connaissances. *Le travail Humain*, 37(1), 1974.
- Lecuyer, A., Burkhardt, J. M., Coquillart, S., & Coiffet, P. (2001). *Boundary of Illusion : an Experiment of Sensory Integration with a Pseudo-Haptic System*. Paper presented at the IEEE Virtual Reality Conference, Yokohama, Japan 13-17 march 2001.
- Lecuyer, A., Megard, C., Burkhardt, J.-M., Lim, T., Coquillart, S., Coiffet, P., & Graux, L. (2002). *The effect of haptic, visual and auditory additional information on an insertion task*. Paper presented at the Immersive Projection Symposia IPT-VR 2002, 24-28 march 2002, Orlando.
- Leibe, b., Starner, T., Ribarsky, W., Wartell, Z., Krum, D., Singletary, B., & Hodges, L. (2000). *The perceptive workbench: towards spontaneous and natural interaction in semi immersive environments*. Paper presented at the IEEE Virtual Reality Conference, New Brunswick USA, 18-22 march 2000.
- Leplat, J. (1955). Analyse du travail et formation. *Bulletin du CERP*, 4(2), 175-184.
- Leplat, J. (1997). Simulation et simulateur : principes et usages. In J. Leplat (Ed.), *Regards sur l'activité en situation de travail : contribution à la psychologie ergonomique* (pp. 157-181). Paris: PUF.
- Liu, B., Salvendy, G., & Kuczek, T. (1999). The role of visualization in understanding abstract concepts. *International journal of cognitive ergonomics*, 3(4), 289-305.
- Loftin, R. B., Kenney, P. J., Benedetti, R., Culbert, C., Engelberg, M., Jones, R., Lucas, P., Menninger, M., Muratore, J., Nguyen, L., Saito, T., Savely, R. T., & Voss, M. (1994).

- Virtual Environments in Training: NASA's Hubble Space Telescope Mission: Home page : www.jsc.nasa.gov/cssb/vr/.
- Lombard, M., & Ditton, T. (1997). At the heart of it all : the concept of telepresence. *JCMC - (available on <http://jcmc.huji.ac.il/>)*, 3(2).
- Lourdeaux, D. (2001). *Réalité Virtuelle et formation : Conception d'Environnements Virtuels Pédagogiques*. Unpublished Thèse de doctorat en Informatique, Ecole des Mines de Paris.
- Lourdeaux, D., Burkhardt, J.-M., Bernard, F., & Fuchs, P. (à paraître). Relevance of an intelligent tutorial agent for virtual reality training systems. *International Journal of Continuing Engineering Education and Life-long Learning*.
- Maherzi, L. (1997). *Rapport mondial sur la communication : les médias face aux défis des nouvelles technologies*: Editions UNESCO.
- Malik, E., Martin, B., Peci, I., & Vivian, R. (2001). *Le retour de force : une aide à l'apprentissage des mathématiques pour les enfants déficients visuels ?* Paper presented at the Actes de la conférence JIM'2001 : Interaction Homme-Machine & Assistance, Metz, juillet 2001.
- Mellet d'Huart, D. (2001a). *La réalité virtuelle : un média pour apprendre*. Paper presented at the Hypermédias et apprentissages, Grenoble, 9-10 avril 2001.
- Mellet d'Huart, D. (2001b). *Training beyond the reality: when the abstract becomes real*. Paper presented at the Virtual Reality International Conference VRIC 2001, 16-18 Mai 2001, Laval France.
- Mellet d'Huart, D., Richard, P., & Follut, D. (2001). *VR for education and Training: state of the art and typology of uses*. Paper presented at the Virtual Reality International Conference VRIC 2001, 16-18 Mai 2001, Laval France.
- Merickel, M. L. (1994). The relationship between perceived realism and the cognitive abilities of children. *Journal of research on Computing in Education*, 26(3), 371-381.
- Moreno, R., Mayer, R. E., Spires, H. A., & Lester, J. C. (2001). The case for social agency in computer-based teaching: do students learn more deeply when they interact with animated pedagogical agents? *Cognition and instruction*, 19(2), 177-213.
- Neuman, D., Marchionini, G., & Morrel, K. (1995). Evaluating Perseus 1.0: methods and final results. *Journal of Educational Multimedia and Hypermedia*, 4(4), 365-382.
- Ombredane, A. (1955). Introduction. In A. Ombredane & J.-M. Faverge (Eds.), *L'analyse du travail* (pp. 1-18). Paris: PUF.
- Paljic, A., Coquillart, S., Burkhardt, J.-M., & Richard, P. (2002). *A study of distance of manipulation on the responsive workbench*. Paper presented at the Immersive Projection Symposia IPT-VR 2002, 24-28 march 2002, Orlando.
- Paquette, G. (1995). Modelling the virtual campus. In B. Collins & G. Davies (Eds.), *Innovative adult learning with innovative technologies* (pp. 65-79). Amsterdam: Elsevier.
- Patrick, J. (1992). *Training : research and Practice*. London: Academic Press.
- Petre, M., Price, B., & Carswell, L. (1996). *Moving Programming teaching onto internet : work in progress*. Paper presented at the PPIG 8 (psychology of programming Interest Group, 10-12 avril 1996 Ghent Belgique).
- Potka, J. (1995). Immersive training systems : Virtual reality and education and training. *Instructional science*, 23, 405-431.
- Regenbrecht, H. T., Schubert, T. W., & Friedman, F. (1998). Measuring the sense of presence and its relations to fear of heights in virtual environments. *International Journal of Human-computer interaction*, 10(3), 233-249.
- Régnier, J., & de Montmollin, M. (1968). Reconnaissance de l'organisation, recherche de l'ordonnement des éléments et choix du mode d'enseignement de la matière. *Le travail humain*, 31(3-4), 239-252.

- Reinhardt-Rutland, A. H., Annett, J. M., & Gifford, M. (1999). Depth perception and indirect viewing: reflections on minimally invasive surgery. *International journal of cognitive ergonomics*, 3(2), 77-90.
- Roth, W.-M. (2001). Modeling design as situated and distributed process. *Learning and instruction*, 11, 211-239.
- Samurcay, R., & de Keyser, V. (1998). Formation, simulateur et simulation (coordinateurs du numéro spécial). *Le travail humain*, 61(4), 305-402.
- Schneiderman, B., Borkowski, E. Y., Alavi, M., & Norman, K. (1998). *Emergent patterns of Teaching/Learning in Electronic Classrooms* (Rapport RR98-04): University of Maryland.
- Schwartz, M. (1999). Haptic perception of the distance walked when blindfolded. *Journal of experimental Psychology: Human perception and performance*, 25(3), 852-865.
- Sebillote, S. (1991). Décrire des tâches selon les objectifs des opérateurs. De l'interview à la formalisation. *Le Travail humain*, 54(3), 193-223.
- Shawver, D., Sobel, A., Prasad, M., & Tapia, L. (2000). Design and implementation of a virtual reality system and its application to training medical first responders. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 9(6), 524-556.
- Shepherd, A., & Kontogiannis, T. (1998). Strategic Task Performance: a model to facilitate the design of instruction. *International journal of cognitive ergonomics*, 2(4), 349-372.
- Six-Touchard, B. (1998). Développement de la compétence tutorale par l'outil d'auto-analyse du travail. *Education permanente*, 135(2), 87-98.
- Specht, M., & Burkhardt, J.-M. (2000). *Résultats des tests utilisateurs : vers un site de ressources pour l'enseignement et la direction des écoles* (rapport de fin de contrat Nathan LEI-2000-01). Paris: Université Paris 5.
- Sperandio, J.-C. (1984). *L'ergonomie du travail mental*: Masson.
- Sperandio, J.-C. (Ed.). (1993). *L'ergonomie dans la conception des projets informatiques*. Toulouse: Octares editions.
- Stanney, K. M., Mourant, R. R., & Kennedy, R. S. (1998). Human factors issues in virtual environments : a review of the litterature. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(4), 327-251.
- Stone, R. (1994). Virtual reality : never put your body where your mind's not been before. *EACE Quarterly*, 1(1), 13- 22.
- Stytz, M. R., Banks, S. B., Garcia, B. W., & Godsell-Stytz, G. M. (1997). *A virtual environment for emergency medical training*. Paper presented at the Interfaces 97 6 th International Conference, Montpellier 28-30 may.
- Syseca. (1998a). *Industrial application of VR* (report 1786-DOC-97-D-2700-C0017165). Brussels: VR for Europe Project - European Commission, DG III.
- Syseca. (1998b). *State of the art survey* (report 1786-DOC-98-2699-C-C0017165). Brussels: VR for Europe Project - European Commission, DG III.
- Teiger, C., Lacomblez, M., & Montreuil, S. (1997). *Apport de l'ergonomie à la formation des opérateurs concernés par les transformations des activités et du travail*. Paper presented at the XXXII ème congrès de la SELF, Lyon, 17-19 septembre 1997.
- Tricot, A. (1995). Un point sur l'ergonomie des interfaces hypermédias. *Le Travail Humain*, 58(1), 17-45.
- Tricot, A., & Bastien, C. (1996). La conception des hypermédias pour l'apprentissage : structurer des connaissances rationnellement ou fonctionnellement ? In E. Bruillard & J.-M. Baldner & G.-L. Baron (Eds.), *Hypermédias et apprentissage* (Vol. 3, pp. 23-33): INRP.
- Vermersch, P. (1976). *Une approche de la régulation de l'action chez l'adulte. Registre de fonctionnement, déséquilibre transitoire et microgénése. Un exemple : l'analyse*

- expérimentale de l'apprentissage du réglage de l'oscilloscope cathodique.* Unpublished Thèse de doctorat de 3ème cycle, Université Paris V, Paris.
- Verna, D., & Grumbach, A. (1998a). Can we define Virtual Reality? The MRIC Model. In J.-C. Heudin (Ed.), *Virtual worlds 98, LNAI 1434* (pp. 29-41). Berlin: Springer Verlag.
- Verna, D., & Grumbach, A. (1998b). *Sémantique et localisation de l'assistance en réalité virtuelle.* Paper presented at the GTRV-98, 12-13 mars 1998.
- Veizin, J. F. (1974). Modalité de présentation des informations favorisant la vue d'ensemble. Leur rôle dans l'apprentissage. *Le travail Humain*, 36(1), 73-92.
- Willans, J. S., & Harrison, M. D. (2001). A toolset supported approach for designing and testing virtual environment interaction techniques. *International Journal of human-Computer Studies*, 55, 145-165.
- Wingrave, C. A., Bowman, D. A., & Ramakrishnan, N. (2001). *A first step towards Nuance-Oriented Interfaces for virtual Environments.* Paper presented at the Virtual Reality International Conference VRIC 2001, 16-18 Mai 2001, Laval France.
- Witmer, B. G., & Sadowski, W. J. (1998). Nonvisually guided locomotion to a previously viewed target in real and virtual environments. *Human Factors*, 40(3), 478-488.
- Youngblut, C. (1998). *Educational Uses of Virtual reality Technology* (report H 98-000105): Institute for Defense Analyses.
- Zeltzer, D. (1992). Autonomy, interaction and presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1), 127-132.
- Zwaneveld, B., & Vuisst, G. (1995). A cognitive tool for learning mathematics. In B. Collis & G. Davies (Eds.), *Innovative adult learning with innovative technologies* (pp. 91-98). Amsterdam: Elsevier.

VII Références bibliographiques de la partie IV

- BENVENISTE, E. (Ed.) (1966). Problèmes de linguistique générale (vol.1). Paris : Gallimard.
- BLANCHET, A. (1991a). L'évaluation discursive de l'efficacité thérapeutique. In R. Ghiglione et A. Blanchet, Analyse de contenu et contenus d'analyses. Paris : Dunod.
- BLANCHET, A. (1991b). Analyse de contenu d'un discours produit par entretien de recherche. In R. Ghiglione et A. Blanchet, Analyse de contenu et contenus d'analyses. Paris : Dunod.
- CASTEL, P. (1995). Les formulations du référent noyau comme trace de positions idéologiques. Bulletin de Psychologie, T48, n°421, 681-686.
- GHIGLIONE, R. (ed.)(1989). Je vous ai compris. Paris : Colin.
- GHIGLIONE, R. (1991a). Histoire d'analyses et analyse de l'histoire. In R. Ghiglione & A. Blanchet, Analyse de contenu et contenus d'analyses. Paris, Dunod.
- GHIGLIONE, R. (1991b). L'analyse propositionnelle dans tous ses états. In R. Ghiglione & A. Blanchet, Analyse de contenu et contenus d'analyses. Paris, Dunod.
- GHIGLIONE, R., BLANCHET, A. (1991). Analyse de contenu et contenus d'analyses. Paris: Dunod.
- GHIGLIONE, R., CASARI, G. (1989). Communication et communication politique. In R. Ghiglione (Ed.), Je vous ai compris ou l'analyse des discours politiques. Paris, Armand Colin.
- GHIGLIONE, R., KEKENBOSCH, C., LANDRE, A. (1995). L'analyse cognitivo-discursive. Grenoble : PUG, coll. La Psychologie en Plus.
- GHIGLIONE, R., MATALON, B., BACRI, N. (1985). Les direx analysés : l'analyse propositionnelle du discours. Paris, Presses Universitaires de Vincennes.
- GHIGLIONE, R., LANDRÉ, A., BROMBERG, M., & MOLETTE, P. (1998). L'analyse automatique des contenus. Paris : Dunod.
- LE ROUX, B., RICHARD, J.F., ROUANET, H. (1995). Introduction à l'analyse des comparaisons et à l'analyse des données. In R. Ghiglione et J.F. Richard (Eds.), Cours de Psychologie, T6 : Processus et applications. Paris : Dunod.
- ROUANET, H., LE ROUX, B. (1993) L'analyse des données multidimensionnelles. Paris, Dunod.
- WOLFF, M. (à paraître). Apports de l'analyse géométrique des données pour l'analyse de l'activité. In: J.C. Sperandio & M. Wolff (Eds.), Modèles et formalismes de modélisation pour l'ergonomie. Paris : PUF- Le Travail Humain.
- WOLFF, M., GROSGEORGE, B. (1996). Analyse des tests de détection par l'analyse post-factorielle. Cahiers d'anthropologie et de biométrie humaine, XIV, 3-4, 13-34.
- WOLFF, M., ROUANET, H., GROSGEORGE, B. (1998). Analyse d'une expertise professionnelle : l'évaluation des jeunes talents au basket-ball de haut niveau. Le Travail Humain, T61, 3, 281-303.
- WOLFF, M., SPERANDIO, J.C. (2000). Analyse multidimensionnelle d'entretiens individuels pour l'étude d'un retour d'expérience. In B. Méliet & Y. Quéinnec (Eds.), Communication et travail (pp. 2-8). Toulouse : Octarès, collection colloques
- WOLFF, M., SPERANDIO, J.C. (2001). Analyse de contenus en ergonomie :

contributions des logiciels APD et Tropes. In J.L. Beauvois (Ed.), Rodolphe Ghiglione : un parcours théorique et son impact. Grenoble : PUG.

Logiciels utilisés pour l'analyse de données

- ADDAD : Association pour le Développement et la Diffusion de l'Analyse de Données. 151, Boulevard de l'Hôpital, 75 013 Paris. Programmes "Ancomp", "Acppon" et "Ancorr" de la bibliothèque.

Site en construction : <http://www.paris.ensam.fr/ailleurs/addad>

- DS3 Windows (1997). Auteur : D. Corroyer. Université René Descartes (Paris 5), UFR de Psychologie. Programme "Tableaux de contingence" de la bibliothèque.

Diffusion : APETISD, 68 avenue de la Faisanderie. 91 800 Brunoy. e-mail : apetisd@wanadoo.fr

- EyeLID2 (version 2.01 - 1993). Auteurs : J.M Bernard, H. Rouanet & R.Baldy.

Groupe Mathématique et Psychologie (CRIP5) et Université René Descartes (Paris 5). UFR Mathématiques et Informatique, 45 rue des Saints-Pères. 75 006 Paris.

VIII Annexe technique

VIII.1 Présentation du LEI de l'Université Paris 5

Le Laboratoire d'Ergonomie Informatique (LEI) dirigé par Jean-Claude Sperandio, est parmi les laboratoires français d'ergonomie cognitive, l'un des premiers à avoir consacré une direction de recherches à la réalité virtuelle. Des recherches déjà réalisées, ou en cours, visent à formaliser puis valider les critères et les démarches de conception et d'évaluation de ces nouveaux outils de réalité virtuelle, du point de vue de l'ergonomie des dispositifs (e.g. Lecuyer et al., 2001; Lecuyer et al., 2002; Paljic, Coquillart, Burkhardt, & Richard, 2002) et de leur impact en termes de cognition (Burkhardt, Lourdeaux, & Fuchs, 1999 ; Frejus, 1997). Plus largement, un axe principal de recherches du LEI concerne les nouvelles technologies appliquées à la formation (voir par exemple Burkhardt et al., 1998 ; Frejus & Drouin, 1996).

VIII.2 Rappel de la Méthodologie du projet

La première phase correspond à l'analyse et à la production d'une synthèse de la littérature scientifique sur le domaine de la réalité virtuelle utilisée pour la formation. Plutôt que limitée aux frontières d'un outil particulier, notre approche vise à appréhender les situations de formation dans leur globalité. Plusieurs points de vue sont envisagés :

- les caractéristiques du processus d'apprentissage (déroulement, efficacité, contraintes...)
- les caractéristiques de la situation de formation
- l'ingénierie à mettre en place (intervenants, aspects critiques de la conception, pérennité, aspects critiques pour la mise en œuvre, coût, latence entre l'identification

des objectifs et réalisation de la formation, limites et maturité de la technique impliquant ou non l'existence de règles de conception, guide, méthodologie formalisée etc...)

La seconde phase correspond à une campagne d'entretiens (libres puis armés) avec différents acteurs dans le domaine des simulateurs et de la réalité virtuelle :

- en interne à la SNCF (décideurs RH ; concepteurs à divers titres de simulateurs et ou/RV ; formateurs utilisateurs ; stagiaires utilisateurs)
- en externe (sont envisagés par exemple EDF, ETAS, Aérospatiale...)

Parallèlement, des observations de formations utilisant l'une ou l'autre de ces technologies sont aussi envisagées.

La troisième phase consistera à un travail de mise en forme de l'ensemble des données recueillies à partir desquelles on essaiera de dériver des outils et de proposer des pistes de réflexion pour la conception des nouveaux outils de formation, en particulier lorsqu'il s'agit de la simulation et de la réalité virtuelle. Cette mise en forme s'effectuera par l'utilisation conjointe de méthodes d'analyse de discours et d'analyse géométrique de données (cf. Wolff, Rouanet et Grosgeorge, 1998).

VIII.3 Planning de l'étude

Durée : 8 mois

Octobre, novembre, décembre, 2000 : phase 1 analyse et synthèse de la littérature.

Janvier 2001 : rédaction et rendu du rapport de synthèse présentant l'état de l'art

Février, mars, avril 2001 : entretiens, analyse et traitement des données recueillies

Mai 2001 : rédaction et rendu du rapport final

VIII.4 Responsables scientifiques :

J-M Burkhardt et M Wolff, maîtres de conférences au Laboratoire d'Ergonomie Informatique de l'Université Paris 5.

J.-M Burkhardt est membre du comité de programmes de conférences internationales spécialisées dans le domaine de la Réalité Virtuelle (Virtual Reality International Conference – VRIC), et dans les domaines de l'ergonomie cognitive et des Interfaces Hommes Machines (HCI et CHI, European Conference on Cognitive Ergonomics ECCE 2000). Il est responsable d'un enseignement sur les nouvelles technologies de formation en maîtrise de Psychologie de Paris 5.

M. Wolff est spécialisée dans l'utilisation conjointe de l'analyse du discours et de l'analyse géométrique des données pour mener à la modélisation de la pensée experte. Elle est responsable, à l'UFR de Psychologie de Paris 5, de l'enseignement des Statistiques pour le Deug et le DESS d'Ergonomie et responsable de l'enseignement « analyse textuelle » en Maîtrise.