

**Mémoire en vue de l'habilitation à diriger des recherches
soutenue publiquement à l'Université de Provence
le 11 octobre 2010**

Sous la direction de N. Bonnardel, Professeure à l'Université de Provence

**Conception, utilisation et formation : trois perspectives
sur l'apprentissage en ergonomie des technologies
émergentes**

Jean-Marie Burkhardt

Maître de Conférences à l'Université Paris Descartes
Laboratoire **Adaptation Travail Individu**

Jury

Mireille **BETRANCOURT**, Professeure à l'Université de Genève, Rapporteur
Nathalie **BONNARDEL**, Professeure à l'Université de Provence, marraine d'HDR
Françoise **DETIENNE**, Directrice de Recherche CNRS-Telecom Paris Tech, Rapporteur
Todd **LUBART**, Professeur à l'Université Paris Descartes, Président du Jury
Jean-Yves **ROUSSEY**, Professeur à l'Université de Provence, Rapporteur
Jean-Claude **SPERANDIO**, Professeur honoraire à l'Université Paris Descartes, Invité

Remerciements

A Nathalie Bonnardel pour avoir bien voulu accompagner la préparation de cette synthèse, et à mes collègues qui ont bien voulu accepter d'évaluer et de discuter ce travail : Françoise Détienne, Mireille Bétrancourt, Todd Lubart, Jean-Yves Roussey et Jean-Claude Sperandio.

La recherche, comme l'apprentissage, est certes une trajectoire individuelle et personnelle, mais n'existerait pas sans l'aide et le soutien au développement qu'apportent la ou les communautés où prend place cette activité. Je pense d'abord à ceux qui m'ont initié au domaine de l'ergonomie informatique sous ces différentes facettes, avec pour commencer, Jean-Claude Sperandio et Jean-Pierre Duoyer dans le cadre du Certificat de Psychologie Informatique en 1990, ainsi que les enseignants du DESS d'Ergonomie et du DEA de Psychologie des Processus Cognitifs de l'Université Paris 5 et notamment Michèle Lacoste, Vincent Rogard, Jacques Regnier, Jean-Michel Hoc, Janine Rogalski, Jean-François Richard, Claude Bonnet, Henriette Bloch, Rodolphe Ghiglione, Benjamin Matalon. Je tiens ensuite à remercier Françoise Détienne, André Bisseret, Suzanne Sebillotte, Dominique Scapin, Willemien Visser, Marie-Pierre Laborne, Marie-Françoise Loubressac, Sophie Chatel, Jean-François Rouet, Latifa Taleb, Laurence Perron, Hamid Hamouche, Belen Alonso, Fernando Gamboa, Carol-Ina Trudel, Françoise Darses, Susan Wiedenbeck, Warren Sack. Grâce à vous, les années de recherche passées dans le projet de Psycho-Ergo de l'INRIA furent stimulantes et pour tout dire idéales.

Je tiens également à remercier les membres du Laboratoire d'Ergonomie Informatique, devenu par la suite laboratoire Ergonomie Comportement Interaction puis associé aujourd'hui au Laboratoire Adaptation Travail Individu, ainsi que plus largement les collègues de l'Université Paris 5 René Descartes, avec lesquels j'ai pris plaisir à échanger et à collaborer de diverses façons et sur des sujets objectivement variés : Jean-claude Sperandio, Janou Bourdeau, Cécilia de la Garza, Catherine Delgoulet, Gérard Uzan, Gabriel Michel, Christian Bastien, Marion Wolff, Maryline Specht, Vincent Rogard, Pierre Taranne, Jean-François Camus, Hubert Tardieu, Valérie Gyselinck, Marie-France Ehrlich, Charlotte Gounelle, Philippe Cabon, Sophie Capo, Samira Bourgeois, Charlotte Gaudin, Christophe Mouchiroud, Todd Lubart, Maria Perreira, Franck Zelasny, Noelle Lidvan, Aline Cohen de Lara, Benoit Verdon, Clara Duchet, Geneviève Coudin, Virginie Bonnot, Sylvia Kraut-Gruber, Laurence Chaby, Emmanuel Devouche.

Ce travail de recherches sur les technologies émergentes doit évidemment beaucoup aux échanges et idées nées au sein des projets menés dans le champ de la réalité virtuelle, mixte et augmentée. Je tiens ici à remercier les collègues qui m'ont offert la chance de travailler sur les questions touchant à ces nouveaux environnements, notamment Philippe Fuchs, Domitile Lourdeaux, Guillaume Moreau, Simon Richir, Christine Mégard, Benoit Bardy, Annie Drouin, Daniel Mellet-d'Huart, Claude Andriot, Sabine Coquillart, Jean-Louis Vercher, Daniel Mestre, Bruno Arnaldi, Jacques Tisseau, Stéphane Donikian, Georges Michel, Jean-Louis Dautin, Anatole Lécuyer, Lionel Dominjon, Patrick Bourdot, Jean-Marc Vézien, Alexis Paljic, Mehdi Ammi, Fabrice Lamarche, Pierre Chevallier, Patricia Plénacoste, Laurence Perron, Pierre Leclercq, Stéphane Safin, Mariano Alcaniz, Christina Bottella, Mirabelle D'Cruz, Sue Cobb. Ce travail s'appuie aussi pour une bonne part sur les interactions toujours riches que j'ai pu avoir avec des chercheurs dans les champs des Environnements Interactifs pour l'Apprentissage Humain, notamment Georges-Louis Baron, Michael Baker, Jean-Marc Labat, Pierre Tchounikine, Christophe Després, André Tricot, Pascal Leroux, Eric Bruillard, Michelle Joab, Eric Jamet, Franck Gasnier, Elena Pasquinelli ainsi que sur les échanges –pour certains de longue dates - avec Jacques Leplat, Pierre Pastré, Pierre Falzon, Bruno Maggi, Christine Vidal-Gomel, Jeanine Rogalski, Catherine Delgoulet et Marianne Lacomblez, Michel Denis, notamment sur ces questions à l'intersection entre les domaines de l'ergonomie, de la psychologie, de la formation et de l'apprentissage. Merci à tous.

Bien sur, un remerciement particulier à mes étudiantes et étudiants en doctorat et en master qui, pour les plus anciennes, sont pour beaucoup dans les réalisations exposées ici : Margarita Anastassova, Flore Barcellini, Sarwan Abbasi, Emilie Loup-Escande, Maja Wrzesien, Linda Moutsinga Mpaga, Julien Nelson, Stanislas Couix, Farah Arab et Anne-Marie Hebert.

Enfin, un remerciement à mes proches qui ont eu à supporter les indisponibilités chroniques et l'envasissement récurrent de l'espace par des montagnes de feuillets, tout au long de cette rédaction.

A mes parents et à mes grands-parents,
à Sharmila

à Adrien et à Elisa-Priti

Résumé

Le travail présenté dans cette synthèse découle d'un questionnement sur la façon dont l'ergonomie informatique intègre les dimensions de l'apprentissage et du développement humains dans le contexte particulier des activités en lien avec les artefacts issus des technologies émergentes.

L'exposé est organisé en cinq parties.

La première partie intitulée « ergonomie, technologies émergentes et apprentissage » présente certains aspects de la conception et de l'évaluation des technologies émergentes. Une illustration rapide en est faite au travers de deux exemples que sont les technologies de la Réalité Virtuelle, Mixte et Augmentée, d'une part, et les technologies de travail et de coopération à distance, d'autre part.

La seconde partie s'intitule « conception et apprentissage ». Elle se centre sur l'ergonomie des activités de conception, retrace l'évolution des études dans ce domaine et souligne la faible prise en compte de dimensions liées à l'apprentissage. Deux directions dans lesquelles l'apprentissage est néanmoins abordé sont présentées, ainsi que les contributions empiriques associées : la question de la facilitation des apprentissages croisés mutuels, d'une part, et l'apprentissage organisationnel et la mémoire de projet, d'autre part. Les perspectives ainsi ouvertes sont évoquées en ce qui concerne l'étude et l'outillage des activités de conception.

La troisième partie « utilisation et apprentissage » expose deux directions complémentaires de l'apprentissage en lien avec l'utilisation d'un artefact issu des nouvelles technologies et considère comment cette dimension de l'apprentissage est prise en compte dans la conception et l'évaluation ergonomiques de ces technologies. Dans la suite, je présente certaines de mes études empiriques concernant d'une part l'apprentissage de l'utilisation et, d'autre part, ce qui est appris (ou ce qu'il est possible d'apprendre) au travers de l'utilisation.

La quatrième partie, intitulée « formation et apprentissage », traite des technologies émergentes appliquées au domaine de la formation. J'y aborde en particulier l'ergonomie des technologies d'apprentissage et de la réalité virtuelle et augmentée appliquées à la formation où je présente plusieurs contributions. Une dernière section est consacrée à des propositions d'outillage et des travaux en cours.

La partie finale présente un bilan des contributions et un projet général de recherches dans le champ de l'ergonomie des technologies émergentes. Deux axes sont en particulier soulignés. Le premier concerne le développement d'une approche multidimensionnelle et développementale de l'activité dans les nouveaux espaces mixtes à l'interface du «réel» et du «virtuel». Le second concerne le développement d'une ergonomie des technologies émergentes élargie au champ et aux questions liées à l'innovation.

Mots-clés : ergonomie, technologie émergentes, apprentissage, conception, utilisation, formation

Plan

1 INTRODUCTION.....	15
1.1 AXE CENTRAL DE QUESTIONNEMENT DE CE DOCUMENT	15
1.2 PRINCIPALES EVOLUTIONS DE MES RECHERCHES	16
1.3 ETAPES DANS MON PARCOURS	17
1.4 TRAVAUX PRESENTES	18
1.5 ORGANISATION DU DOCUMENT	19
1.6 CONVENTIONS DE PRESENTATION	19
2 TECHNOLOGIES EMERGENTES, ERGONOMIE ET APPRENTISSAGE (SYNTHESE).....	23
2.1 LES TECHNOLOGIES EMERGENTES : SPECIFICITE ET OPPORTUNITES POUR LA RECHERCHE ET L'INTERVENTION EN ERGONOMIE COGNITIVE	23
2.1.1 <i>Une hybridation croissante avec d'autres technologies existantes ou à venir qui s'accompagne d'un fort développement de l'ubiquité</i>	24
2.1.2 <i>Une conception focalisée sur l'artefact et sur les avancées potentielles plus que sur l'usage et l'utilisation concrète</i>	25
2.1.3 <i>Un matériau plastique pour une conception rapide et itérative s'appuyant sur la participation des utilisateurs</i>	26
2.2 DEUX DOMAINES ILLUSTRATIFS DES TECHNOLOGIES EMERGENTES	26
2.2.1 <i>Technologies d'assistance à la coopération dans les communautés virtuelles</i>	27
2.2.2 <i>Technologies de la réalité virtuelle, mixte et augmentée</i>	27
2.2.3 <i>Convergence des deux domaines : vers des espaces virtuels collaboratifs multimodaux</i>	29
2.3 LA FAIBLE PRISE EN COMPTE DE L'APPRENTISSAGE DANS L'ERGONOMIE DES TECHNOLOGIES EMERGENTES	31
2.3.1 <i>Un détour par quelques clarifications concernant la notion d'apprentissage</i>	31
2.3.2 <i>Une posture dominante en ergonomie des nouvelles technologies : limiter voire éviter l'apprentissage (de l'interface)</i>	33
2.3.3 <i>Constance, réémergence et formes de référence à la dimension « apprentissage » en ergonomie</i>	34
2.3.3.1 <i>L'analyse du travail et de l'activité, première contribution de l'ergonomie au champ de la formation professionnelle</i>	35
2.3.3.2 <i>En retrait à partir des années 1970, la thématique formation et apprentissage revient à partir des années 1990</i>	36
2.3.3.3 <i>Depuis la fin des années 1990</i>	36
2.4 CONCLUSION	37
3 CONCEPTION ET APPRENTISSAGE.....	43
3.1 INTRODUCTION.....	43
3.2 APPROCHES DISCIPLINAIRES DE LA CONCEPTION : QUELS LIENS AVEC L'APPRENTISSAGE ET LE DEVELOPPEMENT ? (SYNTHESE)	43
3.2.1 <i>Sciences de gestion et sociologie : apprentissage organisationnel et développement individuel dans la conception</i>	43
3.2.2 <i>Technologies éducatives et « design-based learning » : la conception, modèle pour l'apprentissage</i>	44
3.2.3 <i>Ergonomie des activités de conception : l'acquisition par des novices de connaissances pour/sur la conception</i>	45
3.2.4 <i>Dimension réflexive de la conception et développement individuel des connaissances professionnelles...</i>	45
3.3 EVOLUTION DES TRAVAUX EN ERGONOMIE DES ACTIVITES DE CONCEPTION (SYNTHESE)	46
3.3.1 <i>Origines et cadre d'analyse initial</i>	46
3.3.2 <i>Des travaux focalisés sur les connaissances du concepteur expert, ses stratégies et l'organisation de son activité</i>	46
3.3.3 <i>Bilan de ces premiers travaux quant aux liens avec l'apprentissage et élargissement récent des questionnements</i>	48
3.3.4 <i>De l'individuel au collectif</i>	48
3.3.5 <i>Du face-à-face au travail à distance</i>	49
3.3.6 <i>D'une approche unidimensionnelle vers une approche multidimensionnelle</i>	50
3.4 L'APPRENTISSAGE ET LE DEVELOPPEMENT DANS LA CONCEPTION (CONTRIBUTIONS EMPIRIQUES)	52
3.4.1 <i>De l'apprentissage lié à l'innovation à l'apprentissage dans et au cours de la conception</i>	52
3.4.2 <i>Apprentissages mutuels croisés entre les acteurs pour produire des artefacts utiles et adaptés</i>	52
3.4.2.1 <i>Nécessité, bidirectionnalité et échelle des apprentissages mutuels croisés entre acteurs</i>	52
3.4.2.2 <i>Une analyse des méthodes de l'ergonomie en termes des apprentissages croisés mutuels</i>	53
3.4.2.3 <i>Contribution des méthodes ergonomiques selon la perspective des apprentissages croisés mutuels : exemple dans une approche « traditionnelle » de la conception</i>	54

3.4.2.3.1	L'analyse des besoins comme phase privilégiée des apprentissages croisés mutuels	54
3.4.2.3.2	Analysier les besoins : une activité mal définie et peu étudiée en ergonomie.....	55
3.4.2.3.3	Faible poids des contributions de l'ergonomie à l'analyse des besoins et hypothèses de généréricité des méthodes dans le domaine des technologies émergentes.....	55
3.4.2.3.4	Le cadre des apprentissages croisés mutuels peut éclairer les contributions des méthodes de l'ergonomie : approches monodirectionnelles vs. co-constructions	56
3.4.2.3.5	Un premier regard sur la contribution des méthodes de l'ergonomie à l'analyse des besoins : facilitation vs. inhibition des apprentissages croisés mutuels.....	57
3.4.2.3.6	Conclusion	58
3.4.2.4	Nouvelles questions sur les apprentissages croisés mutuels dans les communautés de conception distribuée.....	59
3.4.2.4.1	Logiciel libre et communautés de conception associées.....	59
3.4.2.4.2	Deux approches complémentaires pour étudier les échanges entre concepteurs et utilisateurs dans la conception de logiciels libres.....	59
3.4.2.4.3	Interactions entre acteurs et participation effective des utilisateurs à la conception : l'étude d'un processus encadré de conception	60
3.4.2.4.4	Une étude sur 6 ans de l'émergence et des échanges autour d'une idée portée par les utilisateurs	60
3.4.2.4.5	Conclusion : l'analyse des échanges et de la participation montre l'existence d'acteurs frontières, d'espaces frontières et d'objets frontières	62
3.4.3	<i>Apprentissage organisationnel et mémoires de projet : évidence fondée sur le terrain et réflexion sur l'outillage</i>	63
3.4.3.1	Apprentissage organisationnel et maintenance automobile	64
3.4.3.1.1	La conception de véhicule : un système socio-organisationnel incluant l'artefact, la documentation et la maintenance.....	64
3.4.3.1.2	Propriétés des ressources impliquées dans la formation à la maintenance selon la perspective de l'apprentissage organisationnel.....	65
3.4.3.1.3	Conclusion	66
3.4.3.2	Outilage de la mémoire de projets dans les communautés de conception en ligne	66
3.4.3.2.1	Exploiter les relations de citation dans les discussions de conception.....	66
3.4.3.2.2	Perspectives.....	67
3.5	CONCLUSION ET PERSPECTIVES CONCERNANT LE LIEN ENTRE CONCEPTION ET APPRENTISSAGE	67
3.5.1	<i>Renforcer la prise en compte des dimensions de l'apprentissage et du développement individuel dans l'étude des activités de conception</i>	68
3.5.2	<i>Vers un outillage plus ergonomique des recherches et des pratiques de la conception distribuée à distance et dans le domaine du logiciel libre.....</i>	68
3.5.3	<i>Vers une ergonomie des activités en lien avec l'innovation</i>	68
4	UTILISATION ET APPRENTISSAGE	71
4.1	INTRODUCTION.....	71
4.2	ERGONOMIE DES TECHNOLOGIES EMERGENTES : LIENS ENTRE L'UTILISATION ET L'APPRENTISSAGE OU LE DEVELOPPEMENT (SYNTHÈSE)	71
4.2.1	<i>L'apprenabilité : une mesure du coût de l'apprentissage lié à l'interaction Utilisateur/Système.....</i>	72
4.2.1.1	Définition	72
4.2.1.2	Proportion de la procédure connue transférable à la nouvelle procédure d'utilisation	72
4.2.1.3	Distance entre buts à atteindre et moyens disponibles	73
4.2.2	<i>Utilisation et apprentissage : deux objectifs s'excluant mutuellement</i>	74
4.2.2.1	Privilégier l'utilisation en sollicitant les connaissances préalables de l'utilisateur en ce qui concerne sa tâche et son travail	74
4.2.2.2	Privilégier l'utilisation en sollicitant les connaissances et les habitudes d'utilisation de l'informatique	75
4.2.2.3	Une alternative critique : privilégier l'apprentissage plutôt que la facilité d'utilisation	75
4.2.3	<i>L'utilisation : une activité produisant de l'apprentissage et du développement</i>	76
4.2.3.1	Faciliter l'apprentissage en favorisant l'exploration et la mise en œuvre d'une stratégie par essais et erreurs.....	76
4.2.3.2	Faciliter l'apprentissage par la fourniture d'un environnement documenté minimaliste.....	76
4.2.3.3	Susciter l'apprentissage et favoriser le développement des compétences par la conception d'interfaces écologiques	77
4.2.3.4	Adapter le logiciel au développement de l'utilisateur-apprenant	79
4.2.4	<i>Conclusion</i>	80
4.3	APPRENTISSAGE ET UTILISATION : BILAN DES ÉTUDES EN ERGONOMIE DES TECHNOLOGIES EMERGENTES (SYNTHÈSE).....	80
4.3.1	<i>Les études portant sur les progiciels et l'informatisation au travail</i>	81
4.3.2	<i>Les études portant sur des logiciels et des dispositifs grand public</i>	81
4.3.3	<i>Quelques résultats généraux</i>	82
4.3.3.1	L'apprentissage fondé sur l'utilisation et le bricolage apparaît incomplètement efficace	82
4.3.3.2	Les difficultés d'utilisation peuvent s'avérer bloquantes pour l'apprentissage	82
4.3.3.3	La formation à l'utilisation des nouvelles technologies n'est pas vue comme un enjeu, ou s'avère inadéquate	82
4.3.4	<i>Vers une considération des dimensions de l'apprentissage et du développement en lien avec l'utilisation</i>	83

4.3.4.1	Apprendre à utiliser par l'utilisation.....	83
4.3.4.2	Apprendre ou comprendre au travers de l'utilisation	84
4.4	UTILISER COMME MODE D'APPRENTISSAGE DE L'UTILISATION DES OUTILS ISSUS DES NOUVELLES TECHNOLOGIES (CONTRIBUTIONS EMPIRIQUES)	84
4.4.1	<i>Apprentissage et utilisation du logiciel MS Power Point dans un environnement professionnel.....</i>	85
4.4.2	<i>Apprentissage et utilisation d'Internet par les seniors</i>	86
4.4.3	<i>Défauts d'utilisabilité et apprentissage de l'utilisation d'Internet</i>	87
4.4.4	<i>Conclusions.....</i>	88
4.5	APPRENDRE OU COMPRENDRE AU TRAVERS DE L'UTILISATION (CONTRIBUTIONS EMPIRIQUES)	89
4.5.1	<i>Comprendre un artefact abstrait lors de sa (ré)utilisation pour résoudre un nouveau problème : exemple dans la conception orientée-objet.....</i>	89
4.5.2	<i>Comprendre les forces à l'échelle nanoscopique au moyen de l'utilisation d'un simulateur de nanomanipulation : quel effet du retour d'effort et de la fourniture d'analogie ?.....</i>	91
4.5.3	<i>Elaborer une interprétation à partir de la lecture tactile de motifs statiques et dynamiques</i>	93
4.5.4	<i>Conclusion</i>	94
4.6	PERSPECTIVES CONCERNANT L'APPRENTISSAGE ET L'UTILISATION	95
4.6.1	<i>Au-delà de l'apprenabilité, concevoir pour le développement individuel</i>	95
4.6.2	<i>Evaluer les technologies émergentes : passer de l'évaluation de l'utilisabilité à l'étude de l'activité déployée au cours de l'utilisation</i>	96
4.6.3	<i>Etudier (aussi) ce qui est appris ou construit au travers de l'utilisation</i>	96
5	FORMATION ET APPRENTISSAGE	99
5.1	INTRODUCTION.....	99
5.2	DES ENVIRONNEMENTS INTERACTIFS POUR L'APPRENTISSAGE HUMAIN (EIAH) A LA REALITE VIRTUELLE ET AUGMENTEE POUR L'APPRENTISSAGE ET LA FORMATION (SYNTHESE)	100
5.2.1	<i>Les Environnements Interactifs pour l'Apprentissage Humain.....</i>	100
5.2.2	<i>La Réalité Virtuelle, Mixte et Augmentée pour la formation et l'apprentissage</i>	101
5.2.2.1	Les Environnements Virtuels pour l'Apprentissage dans le secteur éducatif.....	102
5.2.2.2	Les Environnements Virtuels pour l'Apprentissage dans la formation professionnelle	102
5.2.2.3	La Réalité Augmentée pour la formation et l'apprentissage.....	103
5.2.3	<i>Evolutions actuelles dans la recherche sur la réalité virtuelle, mixte et augmentée pour l'apprentissage 103</i>	
5.2.4	<i>Quelques considérations sur les projets de formation associés à l'innovation technologique</i> 104	
5.2.4.1	L'ergonomie y est plutôt associée à la conception et à l'évaluation de l'utilisabilité de l'interface.....	104
5.2.4.2	Une attraction pour l'autoformation et une focalisation sur l'apprenant	105
5.2.4.3	Une « appropriation » parfois superficielle des théories psychologiques de l'apprentissage.....	105
5.2.4.4	Peu d'hypothèses précises et d'évaluations sur les bénéfices attendus.....	105
5.3	PERSPECTIVES ET APPROCHES DE L'ERGONOMIE INFORMATIQUE ET DES TECHNOLOGIES EMERGENTES SUR LES SITUATIONS ET LES USAGES LIES A LA FORMATION (SYNTHESE)	106
5.3.1	<i>Les approches génériques en ergonomie et en psychologie pour assister la conception</i> 106	
5.3.1.1	Etudes sur les propriétés générales en lien avec l'apprentissage et les performances d'utilisation	106
5.3.1.2	Normes, critères, standards ergonomiques applicables dans le cas des technologies d'apprentissage	106
5.3.1.3	Utilisabilité et apprentissage : une relation loin d'être claire.....	107
5.3.2	<i>Les approches spécifiques à l'activité et au projet considéré</i> 109	
5.3.2.1	Analyses de l'activité orientée vers l'identification de difficultés d'apprentissage	109
5.3.2.2	Analyses centrées sur l'activité de l'enseignant, du formateur ou sur l'interaction didactique	110
5.3.2.3	Evaluations des maquettes et des prototypes	110
5.4	ETUDES MENEES DANS LE CHAMP DE LA CONCEPTION DE TECHNOLOGIES POUR LA FORMATION ET L'APPRENTISSAGE (CONTRIBUTIONS EMPIRIQUES)	110
5.4.1	<i>Une étude systématique de l'existant dans les environnements virtuels pour la formation</i> 110	
5.4.1.1	Une place importante des formateurs dans les situations de formation avec environnement virtuel.....	111
5.4.1.2	Enrichir les possibilités de la simulation comme rationalité principale pour la conception.....	112
5.4.1.3	L'erreur, le guidage et les rétroactions : des thèmes en cours d'émergence	112
5.4.2	<i>Etudes centrées sur l'apprenant et l'apprentissage</i> 113	
5.4.2.1	Analyse du besoin dans le contexte de l'introduction d'une technologie émergente pour la formation	113
5.4.2.2	Analyse de l'expertise et de l'activité en vue de construire la situation de formation.....	114
5.4.2.3	Analyse de l'activité d'utilisation d'un prototype de réalité augmentée pour l'apprentissage de procédure	114
5.4.3	<i>Etudes centrées sur l'activité de l'enseignant, du formateur ou sur l'interaction didactique</i> 115	
5.4.3.1	Etude comparative de l'activité du directeur d'exercice au cours d'une simulation dans deux configurations contrastées de terrain	115
5.4.3.2	Impact des technologies sur l'activité des formateurs : animation d'une formation traditionnelle vs. d'une session en autoformation	116
5.4.3.3	Interactions apprenant-formateur dans l'apprentissage de l'outil informatique	116

5.4.3.4	Conclusion.....	117
5.5	VERS UNE METHODE ET DES OUTILS DE CONCEPTION DES SITUATIONS DE FORMATION AVEC LES TECHNOLOGIES EMERGENTES CENTREE SUR L'APPRENTISSAGE (PROPOSITIONS METHODOLOGIQUES).....	117
5.5.1	<i>Une représentation pour la mise à plat de tous les « utilisateurs » concernés et des espaces possibles avant la conception.....</i>	118
5.5.2	<i>Des patrons pour ancrer les discussions en conception et limiter l'attraction vers des images d'Épinal ..</i>	119
5.5.3	<i>Faciliter le passage de l'analyse terrain vers la conception de l'environnement virtuel pour l'apprentissage : un langage exploitable pour décrire les actions possibles au cours de la tâche.....</i>	120
5.5.3.1	Suivi de l'apprenant	120
5.5.3.2	Génération du comportement d'acteurs virtuels.....	121
5.5.3.3	Vers un langage de description commun	121
5.5.3.4	Représenter le cheminement du travail en intégrant la coordination entre les acteurs, les actions et les événements 122	
5.5.3.5	Représenter les objets et le domaine du travail.....	123
5.5.4	<i>Conclusion</i>	123
6	CONCLUSION ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE.....	127
6.1	BILAN DES CONTRIBUTIONS.....	127
6.2	DEUX PERSPECTIVES DE RECHERCHES	128
6.2.1	<i>Vers une approche multidimensionnelle et développementale de l'activité dans les nouveaux espaces mixtes à l'interface du « réel » et du « virtuel »</i>	128
6.2.1.1	Appréhender la dimension sociale, collective de l'activité dans ces nouveaux espaces.....	128
6.2.1.2	Le caractère incarné et hybride des interactions implique une évolution des cadres théoriques et des méthodes.128	
6.2.1.3	Le rôle central de la modélisation : modélisation du réel dans le virtuel, modèles virtuels pour agir sur le réel...129	
6.2.2	<i>Vers une ergonomie des technologies émergentes et de l'innovation</i>	129
6.2.2.1	Développer une approche intégrant les utilisateurs (probables, futurs, potentiels) dès l'étape de recherche dans les technologies émergentes	130
6.2.2.2	Etudier et mieux comprendre les mécanismes liés à l'appropriation et au développement des compétences à travers l'utilisation et les usages de ces « nouveaux » espaces d'interaction	130
6.2.2.3	Vers une ergonomie de la conception des situations et des technologies d'apprentissage	131
6.3	CONCLUSION	131
7	REFERENCES	133
8	TRAVAUX ET MEMOIRES D'ETUDIANTS CITES DANS LE DOCUMENT DE SYNTHESE.....	159

Introduction

1 Introduction

Ce document expose un bilan des recherches que j'ai menées ou auxquelles j'ai participé depuis 13 ans. Ces recherches concernent l'ergonomie de la conception informatique. J'ai débuté dans ce domaine à un moment où la terminologie la plus répandue était celle de « nouvelles technologies de l'information et de la communication »-NTIC. On commence à utiliser aujourd'hui le vocable de « technologies émergentes », en étant passé entre temps par la notion de « technologies avancées ». Un point commun à l'ensemble de ces dénominations est qu'elles désignent toutes, à un instant donné, des technologies (parfois les mêmes, par ex. Internet) en cours d'apparition ou d'évolution dans le champ social, au travail comme dans les loisirs. Ces technologies en phase d'introduction ou de mise au point vis-à-vis du public utilisateur (que ce dernier soit d'ailleurs déjà concerné, en passe de l'être, voire que le profil des utilisateurs futurs - et des usages correspondants- ne soit pas clairement encore identifié) offrent un contexte particulier. Les développements technologiques ne sont pas encore totalement maîtrisés, tant sur le plan de la technique proprement dite que sur celui de leur utilisation opérationnelle et sociale, leurs impacts et leurs conséquences sur la vie au travail et hors travail, au niveau individuel ou social. Du fait de leur originalité, il est en outre rare que ces « technologies émergentes » répondent à des besoins explicitement formulés, c'est-à-dire conscients (Anastassova, 2006 ; Robertson, 2001). Il s'agit bien plus souvent de réalisations techniques en recherche d'applications qui répondent à des attentes latentes ou créent directement des besoins (Anastassova, 2006).

Après avoir présenté l'axe central retenu pour l'exposé de ce bilan, j'aborde tour à tour mon parcours, certaines caractéristiques des travaux décrits dans ce document de synthèse et l'organisation adoptée pour leur présentation.

1.1 Axe central de questionnement de ce document

Le travail présenté dans ce document découle d'un questionnement sur la façon dont l'ergonomie informatique intègre les dimensions de l'apprentissage et du développement humains dans le contexte particulier des activités en lien avec les artefacts issus des technologies émergentes. Ce questionnement trouve son origine en 1998, au moment de mon arrivée au laboratoire de Jean-Claude Sperandio à l'Université Paris Descartes. J'ai alors été recruté sur un profil d'enseignements et de recherches ciblant *l'ergonomie des nouvelles technologies pour la formation*, à un moment où existait une forte incitation au déploiement des technologies Internet, et où « émergeaient » les applications industrielles de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée pour l'apprentissage. Le constat, à l'époque, était que l'apprentissage et le développement des individus restaient des dimensions insuffisamment prises en compte dans les approches majoritaires en ergonomie informatique, particulièrement en ce qui concerne le champ de l'interaction humain-ordinateur.

J'ai voulu aborder cette question de *l'apprentissage et du développement* de façon transversale aux domaines et aux catégories d'activités étudiés dans les études en ergonomie des technologies émergentes, et non pas relativement à un domaine ou une activité en particulier. Par exemple, il eut été possible de cibler la lecture de cette question sur l'ergonomie des technologies d'apprentissage. De fait, un certain nombre de mes recherches a été mené dans ce contexte : prototype de cours en ligne dans le cadre d'une université virtuelle pour la formation médicale (par ex. Burkhardt, Michel, Ronca, & Sperandio, 1998), environnement virtuel pour la formation des conducteurs de trains sur ligne grande vitesse (par ex. Burkhardt, Lourdeaux, & Fuchs, 1999 ; Burkhardt, Lourdeaux, & Mellet d'Huart, 2003), outil de réalité augmentée pour la formation des techniciens de la maintenance automobile (Anastassova, Burkhardt, Mégard, & Ehanno, 2005), etc. Je n'ai pas souhaité le faire pour au moins trois raisons. La première raison est qu'il m'aurait fallu exclure les travaux que je mène sur la *conception*, ainsi que ceux portant sur des dispositifs n'ayant pas la vocation explicite à fournir un Environnement Interactif pour l'Apprentissage Humain. Or dans les deux domaines de la *conception* et des *usages des technologies émergentes*, apparaissent clairement des questions et des approches en lien avec l'apprentissage et le développement humain. La seconde raison est la variété des activités comme des technologies impliquées dans mes différents projets. Cette variété interdit de fait l'examen transversal de mes recherches sur la base d'un mécanisme de l'apprentissage ou d'un objet spécifique. La troisième raison est que des synthèses récentes existent aujourd'hui dans le domaine des technologies éducatives (par ex. Tricot, 2007), alors qu'il ne me semblait pas y avoir une cartographie du thème de l'apprentissage et du développement dans le champ plus général de l'ergonomie des technologies émergentes.

Pour présenter ma réflexion sur ce champ, je distinguerai trois grandes catégories d'activités auxquelles les études ergonomiques s'intéressent en relation avec ce type d'artefacts technologiques :

- les activités qui concernent la **conception de l'artefact** lui-même, c'est-à-dire son élaboration et sa construction progressives. Dans ce cas, l'artefact constitue l'objet (en même temps que le produit) de l'activité ;
- les activités qui concernent l'**utilisation de l'artefact**. L'artefact y a alors le statut de moyen mobilisé par un ou plusieurs sujets, dans le cadre d'une tâche¹ ou pour atteindre des objectifs personnels ;
- enfin, les activités qui concernent la **formation du sujet à propos de - ou au moyen de - l'artefact** considéré. L'artefact y prend le statut de cible et/ou de soutien à une acquisition attendue ou incidente.

Ces trois perspectives sur l'activité vont me servir de base pour conduire le questionnement proposé ici sur la place de l'apprentissage et du développement dans les approches de l'ergonomie des technologies émergentes.

1.2 Principales évolutions de mes recherches

Mon parcours a suivi une évolution analogue aux évolutions du domaine de l'ergonomie informatique et des technologies émergentes. Les premières études en ergonomie informatique ont en effet porté sur les informaticiens, délimitant un champ d'études encore actif : la *psychologie de la programmation*. Mes premiers pas dans la recherche ont justement porté sur ce champ, puisqu'ils ont concerné certains des mécanismes cognitifs qui sous-tendent l'activité des concepteurs de logiciels, en lien avec les propriétés de la conception et des langages à objets, nouveau paradigme à l'époque dans le monde professionnel du Génie Logiciel. Mes travaux ont ainsi montré certains des mécanismes mis en œuvre dans la réutilisation, tels la récupération en mémoire d'expérience passée, l'effet différencié de la tâche et de l'expertise sur la compréhension finalisée d'un programme et la structure informationnelle représentée mentalement, et enfin, les stratégies de réutilisation mises en œuvre dans une nouvelle situation-problème à résoudre (Burkhardt, 1997 ; Burkhardt, Détienne, & Wiedenbeck, 2002). Ces travaux ont été menés au sein du projet de Psychologie Ergonomique de l'Institut National de Recherche en Informatique (INRIA), dans le cadre d'une recherche de DEA suivi d'une thèse encadrée par F. Détienne et J.-C. Sperandio.

Mes recherches ont ensuite emprunté trois directions d'extension, à partir de mon intégration en tant qu'ATER (1997) puis maître de conférences (1998) au Laboratoire d'Ergonomie Informatique de l'Université Paris 5, dirigé par J.-C. Sperandio.

La première extension est l'élargissement de mes études à d'autres populations que les concepteurs de logiciels. Cet élargissement se traduit par une diversification des activités et de l'expertise professionnelle impliquée dans les situations étudiées : instituteurs et activités d'enseignement, chercheurs et exploration de données en mécanique des fluides ou en bio-informatique, conducteurs de lignes à grande vitesse et formation aux procédures de dépannage, maintenance industrielle etc. Les profils d'âges et de positionnement vis-à-vis de l'adoption des technologies sont également variés, depuis des études sur l'apprentissage et l'utilisation d'Internet par des seniors jusqu'aux études sur la conception informatique distribuée de logiciels libres. Dans ce dernier cas, les « utilisateurs » possèdent une expertise et une accointance fortes avec la technologie, ne serait-ce que parce que la participation s'y déroule quasi-exclusivement au travers d'Internet, sur la base du volontariat. Ceci étant dit, je n'ai pas abandonné pour autant le domaine de la conception. Ainsi, des études sont en cours ou ont été menées récemment sur la collaboration dans la phase d'esquisse en conception architecturale, sur l'activité de conception de modèles de tâches, ou encore sur la conception dans les communautés du logiciel libre.

La seconde direction est un élargissement vers des cadres permettant d'intégrer la dimension sociale et collective des systèmes de travail, tout en visant à maintenir le lien avec les aspects plus individuels de la cognition. Je mentionnerai juste deux exemples ici. Le premier, dans le domaine de la conception informatique, concerne les travaux débutés depuis 5 ans sur les *nouveaux espaces numériques coopératifs* pour la conception distribuée, dont les projets constitués autour du logiciel libre sont emblématiques. Le second, dont le démarrage a coïncidé avec mon arrivée à Paris 5, porte sur les situations d'apprentissage et de formation en lien avec le développement des nouvelles technologies, qu'il s'agisse d'apprendre à utiliser Internet ou qu'il s'agisse encore de la formation professionnelle des techniciens de maintenance pour accompagner l'évolution des technologies dans l'industrie automobile.

La troisième direction concerne la recherche d'une extension des approches de l'ergonomie cognitive de la conception et de l'usage des nouvelles technologies vers la prise en compte croissante des *interactions*

¹ Bien sur, la tâche peut très bien être une tâche de conception, s'agissant par exemple de l'utilisation d'un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur par des concepteurs.

possibles entre les niveaux physiques et cognitifs de l'activité. Les études menées en ergonomie informatique depuis de longues années se répartissent selon deux domaines entretenant peu de relations du point de vue des modèles, des théories et des paradigmes privilégiés : l'ergonomie physique des situations et des postes de travail informatisés, d'une part ; l'ergonomie des logiciels, essentiellement centrée sur la dimension cognitive et le raisonnement des utilisateurs des systèmes informatisés, d'autre part. Les technologies de la Réalité Virtuelle ou Augmentée remettent en effet en première ligne des questions associant intimement *l'action*, *la cognition* et *la perception*, du fait de la recherche de nouvelles interfaces multimodales (essentiellement en sortie : toucher et retour kinesthésique, vision stéréoscopique, son spatialisé), de l'ambition de beaucoup de ces systèmes d'assister des tâches tridimensionnelles, voire des combinaisons originales entre objets réels et virtuels impliqués dans les interactions. Qui plus est, bien loin de la standardisation des logiciels et dispositifs de bureautique, ce domaine se caractérise par des dispositifs et des techniques d'interaction encore peu conventionnels².

1.3 Etapes dans mon parcours

Plusieurs étapes jalonnent cette évolution. Ainsi, mon premier contact dans la recherche concernant les problématiques d'apprentissage et de formation a été dans le cadre d'un projet de développement de l'université virtuelle médicale à Paris Descartes, en septembre 1997 à mon arrivée au Laboratoire d'Ergonomie Informatique.

Mon premier contact effectif avec la réalité virtuelle s'est fait l'année suivante, en 1998, dans le cadre du projet SOFI pour la formation des conducteurs de trains à la mise en œuvre de procédure sur voies. Ce projet, développé par la SNCF et l'Ecole des Mines de Paris (Burkhardt, Lourdeaux et al., 1999 ; Lourdeaux, 2001) est ainsi à l'origine d'une collaboration suivie avec P. Fuchs et D. Lourdeaux relativement à la conception d'applications de la Réalité Virtuelle pour la formation au travers de plusieurs projets : APLG (Lourdeaux, 2005), V3S (Edward et al., 2006), PERF RV2 (Burkhardt, Lourdeaux, Couix, & Rouillé, 2009) et SAGECE plus récemment à propos de formation à la gestion collective de situations de crise. C'est à cette époque aussi que j'ai eu l'opportunité de rencontrer d'autres personnes qui ont ensuite contribué de façon importante à ces travaux sur la formation avec la réalité virtuelle, notamment D. Mellet d'Huart (AFPA).

En 2000, les hasards de l'arrangement des locaux ont fait que le bureau que j'occupais lorsque je venais à l'INRIA jouxtait ceux de l'équipe de S. Coquillart, dont l'équipe travaillait alors sur la conception de techniques d'interaction 3D et l'évaluation de dispositifs de Réalité Virtuelle dont une table « workbench ». Plusieurs travaux avec cette équipe vont être réalisés dans le cadre de la première plateforme de recherche sur la Réalité Virtuelle financée par le ministère de la recherche (PERF RV). J'ai rencontré A. Lecuyer à cette occasion, ce qui a donné lieu à une collaboration suivie sur l'évaluation de techniques et de dispositifs pour l'interaction visuo-haptique.

En 2002, j'ai encadré ma première étudiante en master recherche (DEA d'Ergonomie), M. Anastassova, dans le cadre d'une collaboration avec le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) et Renault. Il s'agissait d'une recherche en amont pour la conception d'un outil de réalité augmentée d'aide à la maintenance. Ce travail a ensuite été poursuivi dans le cadre de la thèse de M. Anastassova. La même année, j'ai obtenu une délégation à l'INRIA auprès de l'équipe de F. Détienne. Cette délégation a coïncidé avec un projet d'études sur la conception à distance en collaboration avec W. Sack de l'Université de Californie, dans le cadre d'un financement par le fond France-Berkeley. Il s'agissait là de nos premiers travaux sur la conception de logiciels libres et sur l'analyse des interactions entre participants dans ces communautés alors peu étudiées. Ces travaux se sont poursuivis, notamment au cours du master recherche puis de la thèse de F. Barcellini.

A partir de 2004, les travaux sont développés au travers de différents projets, dont plusieurs permettent d'approfondir les idées de modélisation de l'activité en environnement virtuel initiées dans le cadre du projet SOFI en 1998 : les projets V3S, PERF RV2 par exemple. L'idée d'une approche multidisciplinaire sur la question de l'ergonomie et des activités cognitives a ainsi donné lieu à un pré-projet financé durant une année (AMELIE – collaboration avec le CEA, l'IRISA et l'UTC), mais fut abandonnée l'année suivante suite au gel financier de ce programme.

A partir de 2006, j'ai entamé une collaboration avec l'équipe du LIMSI-CNRS, d'une part dans le cadre du projet CORSAIRE qui cible la réalité virtuelle multimodale pour la recherche scientifique et, d'autre part du fait du démarrage de la thèse de S. Abbasi sur l'assistance au raisonnement dans le montage assisté par la réalité virtuelle, en co-direction avec M. Denis. Dans le même temps débute un contrat avec l'INRIA, Orange Labs et l'Université de Liège sur l'évaluation ergonomique de la coopération entre participants dans des

² La Wii est de ce point de vue emblématique de ces dispositifs moins conventionnels dont la pénétration dans le grand public a été extrêmement rapide.

environnements utilisant la réalité augmentée. Ce contrat donne ainsi l'opportunité de réunir, pour la première fois dans un projet financé, les deux directions de recherches ayant auparavant suivie des voies parallèles : la conception (au travers de la phase d'esquisse dans la conception architecturale) et les environnements de réalité augmentée/virtuelle au travers du bureau virtuel (BV).

En 2007 débute une collaboration avec le laboratoire de l'ENSA de Laval, afin de poursuivre le travail initiée par la thèse de M. Anastassova sur l'analyse et l'évaluation des besoins dans la conception d'environnements virtuels, dans le cadre de la thèse de E. Loup-Escande en co-direction avec S. Richir.

1.4 Travaux présentés

Toutes mes recherches ne sont pas présentées dans ce document de synthèse. Je privilégie en effet l'articulation thématique centrale de la prise en compte des dimensions de l'apprentissage en ergonomie des technologies émergentes. Ainsi, à quelques exceptions près, les études menées pour l'évaluation d'interfaces 3D ne sont pas mentionnées dans ce mémoire, du fait de leur focalisation sur l'utilisation plus que sur la dimension d'apprentissage.

Les recherches présentées plus en détail dans ce mémoire sont de différentes natures. Il y a 17 recherches empiriques et 6 synthèses réalisées en appui de ces travaux. Les études empiriques se répartissent en 5 études pour la partie « conception » et 6 études pour chacune des deux autres parties « Utilisation » et « Formation ». J'ai eu la co-responsabilité de 12 de ces travaux, et la responsabilité complète pour les 11 restants.

Du point de vue méthodologique, l'expérimentation concerne 6 des recherches présentées ici, mais on y trouvera également une forte place faite à l'observation et à l'entretien. J'ai eu en effet la chance de travailler dans des contextes variés et avec des méthodes, souvent variées elles-mêmes pour analyser l'activité, du fait du jeu unique de contraintes spécifiques à chaque projet, de l'activité ciblée et ses exigences, ainsi que des objectifs déclarés prioritaires à l'étape d'avancement considérée des projets : analyse documentaire et de la littérature (par ex. Fabre, Couix, Burkhardt, Gounelle, & Cabon, 2006 ; Nelson, 2006), entretiens semi-dirigés centré sur l'activité (par ex. Burkhardt, Domlan, Plot, & Laulagnet, 2007), entretien utilisant la technique des incidents critiques (par ex. Anastassova, Burkhardt, Mégard, & Ehanno, 2005), observations de l'activité actuelle en situations réelles (par ex. Anastassova & Burkhardt, 2009), simulation (par ex. Burkhardt & Détienne, 1995a ; Couix, 2007 ; Nelson, 2007), évaluation de prototypes en laboratoire (Anastassova, Burkhardt, Mégard, & Breda, 2006), évaluation de prototypes en situation écologique (Anastassova, Mégard, & Burkhardt, 2007), construction et évaluation conjointe de storyboards dans des réunions de conception participative entre concepteurs et utilisateurs (Bach, Anastassova, & Burkhardt, 2008 ; Férey et al., 2008 ; Gounelle et al., 2007 ; Nelson, 2006, 2007), questionnaires pour connaître les habitudes et les objectifs de déplacement sur un site d'entreprise (Burkhardt, 2003a). Le plus souvent, ce n'est d'ailleurs pas une mais plusieurs méthodes qui sont articulées et mises à profit, les connaissances ainsi créées par l'une ou par l'autre s'enrichissant mutuellement au fur et à mesure où se construisent les besoins au sein du projet.

Ces travaux ont en commun de viser la prise en compte de l'activité, malgré le fait - ou au contraire du fait - que beaucoup ont été menés dans des contextes technologiques marqués par une demande vis-à-vis de l'ergonomie restreinte aux seules évaluations de la performance et de l'utilisabilité.

Il convient de distinguer les objectifs poursuivis par les recherches ergonomiques et les objectifs propres aux projets dans lesquels elles ont été réalisées : évaluer les problèmes, contribuer à la mise en place d'une solution, développer une recherche. Ces objectifs étaient parfois les objectifs même du projet, mais pouvaient aussi, dans certains cas, en être clairement distincts ou pour le moins indirectement liés.

J'ai mené ces recherches seul ou en collaboration avec des collègues ergonomes, psychologues, formateurs et concepteurs dans le domaine des technologies émergentes. Ces recherches ont également bénéficié grandement des contributions et de l'implication des étudiants qui ont travaillé avec moi dans le cadre de leur Master 1 de Psychologie et de Master 2 d'Ergonomie. Enfin, il me faut souligner la part significative des travaux qui a été réalisée dans le cadre de deux thèses de doctorat co-encadrées soutenues (Anastassova, 2006 ; Barcellini, 2008). Ces travaux sont poursuivis dans le cadre de deux thèses en cours, l'une portant sur la question de l'outillage de l'évaluation de l'utilité dans les projets de Réalité Virtuelle et Réalité augmentée (Loup-Escande, Burkhardt, Christofol, & Richir, 2010) et l'autre sur la question de l'assistance au raisonnement dans les environnements virtuels, dans le contexte de tâches impliquant la résolution d'un problème de montage en 3 dimensions (Abbasi & Burkhardt, 2009 ; Abbasi, Burkhardt, & Denis, 2009).

1.5 Organisation du document

La suite du document est organisée en quatre parties suivies à chaque fois d'une conclusion exposant le projet de recherches.

La première partie intitulée « ergonomie, technologies émergentes et apprentissage » présente certains aspects de la conception et de l'évaluation des technologies émergentes. Une illustration rapide en est faite au travers de deux exemples que sont les technologies de la Réalité Virtuelle, Mixte et Augmentée, d'une part, et les technologies de travail et de coopération à distance, d'autre part. Il est ensuite montré la faible prise en compte, en général, de la dimension d'apprentissage en ergonomie informatique. Je conclus ensuite sur des propriétés liées au domaine des technologies émergentes qui intéressent l'ergonomie.

La seconde partie s'intitule « conception et apprentissage ». Elle se centre sur l'ergonomie des activités de conception, retrace l'évolution des études dans ce domaine et souligne la faible prise en compte de dimensions liées à l'apprentissage. Deux directions dans lesquelles l'apprentissage est néanmoins abordé sont ensuite présentées, ainsi que les contributions empiriques associées : la question de la facilitation des apprentissages croisés mutuels, d'une part, et l'apprentissage organisationnel et la mémoire de projet, d'autre part. Les perspectives ainsi ouvertes sont évoquées en ce qui concerne l'étude et l'outillage des activités de conception.

La troisième partie se nomme « utilisation et apprentissage ». J'y traite deux directions complémentaires de l'apprentissage en lien avec l'utilisation d'un artefact issu des nouvelles technologies. Dans une première partie de synthèse, il s'agit de considérer comment, en ergonomie, est prise en compte la dimension de l'apprentissage dans la conception et l'évaluation de l'utilisation d'un outil issu des nouvelles technologies. Dans la suite, je présente certaines de mes études empiriques concernant d'une part l'apprentissage de l'utilisation et, d'autre part, ce qui est appris (ou ce qu'il est possible d'apprendre) au travers de l'utilisation.

La quatrième partie, intitulée « formation et apprentissage », traite des technologies émergentes appliquées au domaine de la formation. J'y aborde en particulier l'ergonomie des technologies d'apprentissage et de la réalité virtuelle et augmentée appliquée à la formation où je présente plusieurs contributions. Une dernière section est consacrée à des propositions d'outillage et des travaux en cours.

La dernière partie s'appuie sur les perspectives déjà développées dans chacune des parties précédentes pour présenter un bilan des contributions et un projet général de recherches dans le champ de l'ergonomie des technologies émergentes. Deux axes sont en particulier soulignés. Le premier concerne le développement d'une approche multidimensionnelle et développementale de l'activité dans les nouveaux espaces mixtes à l'interface du « réel » et du « virtuel ». Le second concerne le développement d'une ergonomie des technologies émergentes élargie au champ et aux questions liées à l'innovation.

1.6 Conventions de présentation

Deux conventions sont utilisées dans ce document :

- les parties issues de contributions de type articles de synthèse, chapitres etc. sont indiquées par la mention « synthèse ».
- les parties présentant des études sont indiquées par la mention « contributions empiriques ». Dans ces parties, j'indique le cas échéant pour chaque étude une section méthodologie selon un format de texte en retrait et une police plus petite. La lecture de cette section méthodologie n'est pas obligatoire, le texte principal ayant été rédigé pour pouvoir être lu sans y faire référence. Cette section a pour objet de fournir au lecteur intéressé les informations sur la méthode sans avoir à se référer à la publication correspondante.

Technologies émergentes, ergonomie et apprentissage

2 Technologies émergentes, ergonomie et apprentissage (synthèse)

L'ergonomie des technologies émergentes hérite des approches et des méthodes développées en ergonomie informatique, en ce qu'elle se centre essentiellement sur l'utilisation de ces technologies qu'il s'agit de rendre la plus simple et efficace possible pour les utilisateurs.

Deux conséquences en découlent. D'une part, l'utilisation est majoritairement abordée en termes de performance, notamment dans la perspective d'évaluer l'utilisabilité des dispositifs proposés. D'autre part, les difficultés et les erreurs constatées au cours de l'utilisation sont alors considérées comme des écarts ou des défaillances dont l'origine est attribuée selon le cas, à une propriété défectueuse de l'outil ou bien à une défaillance dans les connaissances mobilisées par l'utilisateur. Dans cette approche, la conception et l'évaluation ergonomiques considèrent peu la dimension apprentissage si ce n'est lorsqu'il s'agit de technologies spécifiquement dédiées à *l'apprentissage et la formation*³, i.e. où la tâche assignée vise l'acquisition par l'utilisateur de connaissances ou de compétences liées au travail. Le terme de compétence est pris ici dans son acception la plus large (pour une discussion argumentée, voir de Montmollin, 1990 ; Leplat, 1991 ; Weill Fassina & Pastré, 2004).

Ce chapitre de synthèse propose de clarifier les propriétés des technologies émergentes et d'en discuter les implications pour l'ergonomie informatique. La suite discute quelques caractéristiques de la conception dans ce domaine des technologies émergentes, de l'informatique et des nouvelles technologies. J'en propose ensuite une illustration rapide au travers de la conception des nouveaux espaces virtuels. Je montre en quoi la dimension d'apprentissage apparaît faiblement considérée par les approches ergonomiques dites « centrées sur l'utilisateur », cette dimension étant néanmoins traitée explicitement dans d'autres courants de l'ergonomie plus centrés sur l'activité et le développement des compétences. Je conclus sur la façon d'appréhender ce contexte du développement technologique en tant que « technologies émergentes », sur quelques conséquences qui en découlent pour l'ergonome et sur l'intérêt d'y aborder l'apprentissage.

2.1 Les technologies émergentes : spécificité et opportunités pour la recherche et l'intervention en ergonomie cognitive

Les différents domaines où sont développées les technologies du futur sont familiers de l'engouement cyclique pour une nouvelle terminologie : c'est, après tout, un moyen d'afficher l'innovation dans le champ social et de se démarquer ainsi des technologies du moment. Aujourd'hui, les termes de technologies émergentes tendent à être de plus en plus utilisés. Dans de nombreux discours et textes scientifiques, le terme remplace ou cohabite avec d'autres expressions telles celles précédemment évoquées de *nouvelles technologies*, ou encore de *technologies avancées*, sans que ces notions aient toujours une définition précise. La notion de « technologie émergente » mérite par conséquent d'être précisée.

Les propriétés sous-jacentes aux systèmes techniques et aux artefacts développés dans le cadre des nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) ont été en partie clarifiées depuis une dizaine d'années. En particulier, la notion de convergence a été mise en exergue à cette époque (Maherzi, 1997) pour décrire les conséquences de 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. Deux niveaux de cette convergence nous intéressent en particulier :

- la convergence *technique*, qui correspond à l'adoption de la technologie numérique conjointement dans les domaines de l'informatique, de l'audiovisuel et des télécommunications ;
- la convergence *fonctionnelle* qui traduit l'interchangeabilité potentielle des supports et des services entre ces trois domaines.

Ces deux niveaux de convergence entre différentes "technologies avancées" telles la simulation, le multimédia, et les réseaux sont considérés comme un facteur potentiel d'innovation, en même temps que la convergence est vue comme devant aboutir idéalement sur un progrès substantiel, en particulier par rapport aux technologies plus classiques. Par opposition à ces dernières, les artefacts sociotechniques issus des technologies émergentes ont généralement les caractéristiques suivantes :

³ Par contraste avec les situations de "travail" où la tâche assignée au sujet entre dans le cadre de son activité contractuelle de production, et avec les situations quotidiennes d'usages des produits destinés au grand public.

- ils nécessitent un apprentissage, le développement de compétences et/ou de nouvelles connaissances de la part des utilisateurs (mais aussi de la part des concepteurs). Or l'apprentissage et le développement sont des dimensions peu prises en considération dans la conception ergonomique, en général, en ce qui concerne ces nouveaux espaces numériques en particulier.
- ils sont par définition en évolution, peu et/ou mal connus, en recherche d'applications à la fois comme moteur pour le développement et l'innovation de la technologie émergente en elle-même, et comme justification de la pertinence de cette recherche et de sa valorisation potentielle ;

Les technologies en cours d'émergence aujourd'hui constituent des espaces de conception se caractérisant, pour les acteurs de la conception, par :

- des besoins mal cernés, se restreignant souvent à quelques problèmes stéréotypiques, sans analyse à proprement parler ou, le cas échéant, une analyse superficielle et non fondée sur les besoins réels ;
- des nouvelles dimensions à traiter apparaissent, cela selon plusieurs directions : dimension sociale, intégration multi-sensorielle, commande multimodale, dimension corporelle, etc.

Il en découle deux grandes lignes de questionnement associant l'ergonomie aux technologies émergentes. La première concerne l'élaboration des outils et des méthodologies de conception et d'évaluation de l'interaction dans ces nouveaux espaces à défricher. L'enjeu est notamment la réalisation d'applications des technologies émergentes utiles, utilisables et accessibles. De ce point de vue, les recherches en ergonomie et dans les autres disciplines qui s'intéressent au fonctionnement cognitif et social humain devraient contribuer grandement aux recherches sur ces technologies. La seconde ligne concerne l'apport des technologies émergentes à l'ergonomie pour servir la connaissance scientifique sur la cognition et le comportement humains en situations écologiques. L'innovation technologique propose en effet des outils pour l'étude et la simulation des mécanismes sociaux, cognitifs et sensori-moteurs en environnements virtuels comme en environnements réels pour lesquels la validité, l'accessibilité, l'utilisabilité et l'adéquation aux besoins de la recherche constituent des enjeux forts pour l'ergonomie.

2.1.1 Une hybridation croissante avec d'autres technologies existantes ou à venir qui s'accompagne d'un fort développement de l'ubiquité

Le caractère de plus en plus hybride des artefacts conçus avec et autour du logiciel apparaît comme une autre propriété remarquable des technologies émergentes.

Cette hybridation est en premier lieu technologique. Les futures générations d'interfaces comme celles qui sont développées actuellement dans les domaines de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée impliquent de plus en plus la mobilisation de modalités sensorielles simultanées, selon des boucles plus larges et plus complexes que celles impliquées dans les interfaces classiques de type écran clavier. Les diverses technologies qui fondent ces nouvelles interfaces sont ainsi associées de façon variée : la mécanique, l'informatique, l'électronique, la robotique, l'intelligence artificielle, les réseaux. Il en découle une diversification continue tant des terminaux (portables, systèmes embarqués, systèmes personnels, systèmes « enfouis » ou « wearable ») que des paradigmes d'interaction (par ex. langages de commande, WIMP [Window Icon Menu Pointer], dialogues vocaux, WAP [Wireless Application Protocol], gestes, multimodalité en entrée et en sortie, Environnements Virtuels).

L'hybridation est également fonctionnelle. Plusieurs raisons peuvent expliquer cette évolution sensible :

- la convergence entre des usages et des domaines technologiques autrefois distincts (téléphone sur Internet, navigation sur le Web par l'intermédiaire d'une télévision ou d'un téléphone mobile, etc.) ;
- l'intensification des usages et la diversification des contextes et des environnements d'utilisation de ces nouveaux dispositifs, au travail et dans la vie quotidienne ;
- l'émergence de nouveaux usages, certes liée en partie à cette disponibilité technologique, mais également du fait de deux autres facteurs importants. Le premier est l'élargissement et l'hétérogénéité croissante du public utilisateur (diversité des profils et des compétences tant en informatique que générales parmi la multiplicité des utilisateurs, internationalisation des systèmes, etc.) ; le second est l'apparition de nouvelles tâches (travail et formation à distance, commerce en ligne, programmation par l'utilisateur, par ex. magnétoscope, systèmes de transactions, portables, personnalisation des outils de bureautique ou des progiciels).

Le pendant de cette hybridation réside dans l'ubiquité⁴ croissante de et pour l'utilisateur. D'une part, en effet, les utilisateurs sont mis face à des technologies leur permettant d'être présents simultanément en plusieurs lieux, au moins sur le plan de l'action et de la perception. L'espace d'activité dans lequel l'utilisateur agit, perçoit et se développe, est ainsi de moins en moins régi par un principe d'unité de lieu et de temps. Une illustration d'un tel effet concerne les technologies de la réalité virtuelle où, typiquement, l'utilisateur est mis dans la situation d'être à la fois présent dans un espace réel et dans un espace numérique simulé, voire dans plusieurs espaces numériques en parallèle. D'autre part, les systèmes gagnent eux-mêmes en ubiquité, c'est-à-dire qu'ils offrent aux utilisateurs la capacité et la continuité d'accès à des services numériques par l'intermédiaire d'une multitude de dispositifs (généralement petits, simples et munis de capteurs) déployés dans tout l'environnement, interconnectés, sensibles au contexte et pourvus d'une certaine « intelligence ». Ce dernier terme d'intelligence réapparaît d'ailleurs de façon récurrente à la faveur de nouvelles vagues technologiques. Il signifie essentiellement ici que les dispositifs développés visent à être dotés de capacités (a) à percevoir des informations pertinentes liées au contexte (par ex. ambiance sonore, lumineuse, mouvement) ; (b) à traiter et à comprendre les modalités naturelles de communication et d'expression de l'utilisateur humain (par ex. geste, mimique, signal de parole) et ; (c) à « apprendre » au fur et à mesure des interactions avec ses utilisateurs afin de s'adapter au mieux à leur façon de faire.

2.1.2 Une conception focalisée sur l'artefact et sur les avancées potentielles plus que sur l'usage et l'utilisation concrète

Une critique couramment formulée à l'encontre de l'informatique, et des technologies émergentes en général, est la prédominance d'une approche « techno-centrée », i.e. lorsque la conception est focalisée exclusivement sur les composants techniques. Dans le cas d'un développement finalisé par une application réelle, les inconvénients d'une telle approche sont bien connus, parmi lesquels l'absence de prise en compte des éléments pertinents concernant les utilisateurs, leur activité et les contextes d'usage variés où elle prend place. Il en a découlé un ensemble d'outils et de propositions méthodologiques visant à intégrer ces aspects manquants dans les processus de conception : conception centrée sur les utilisateurs (Norman & Draper, 1986), conception pour l'utilisabilité (Nielsen, 1993), conception centrée sur l'humain (Maguire, 2001).

Dans le domaine de la recherche technologique, l'objectif poursuivi en premier lieu concerne certes la mise au point technologique. Les systèmes conçus (démonstrateurs, maquettes et prototypes) ont la vocation de montrer l'intérêt voire de valider un concept ou une théorie, différent en cela fortement de l'objectif d'obtention d'outils fonctionnels, utiles et utilisables dans un contexte d'ingénierie classique. Pourtant, la prise en compte des besoins du point de vue des utilisateurs est susceptible d'apporter un bénéfice important pour la recherche à plusieurs niveaux. D'une part, cela permet de faire émerger de façon précise les applications concrètes vers lesquelles orienter voire favoriser ensuite le développement technologique. La recherche et le développement des nouvelles technologies est en effet propice aux fausses « bonnes idées » qui ne résistent pas à une analyse des besoins réels des utilisateurs. Le risque est d'engager des efforts sur un développement dont l'utilité, in fine, sera difficile à justifier, voire en amenuisera l'acceptabilité. Parallèlement, les usages et les applications potentiels peuvent stimuler la recherche en révélant des questions et des problématiques non anticipées. Enfin, l'inventivité apportée par les utilisateurs n'est pas alors mise à profit. D'autre part, cela permet d'avancer en parallèle sur la recherche et le transfert vers les applications potentielles.

Cette tendance à focaliser le périmètre de la conception sur l'artefact est confirmée par plusieurs éléments aujourd'hui encore. Ainsi, à travers la littérature, des synthèses récentes dont certaines auxquelles j'ai contribué, concluent que peu de travaux s'appuient aujourd'hui sur des analyses réelles, tandis que les scénarios-jouets » et les hypothèses floues ou génériques foisonnent sur les éventuels besoins pour lesquels la technologie apporterait une solution prometteuse (par ex. Anastassova, 2006 ; Anastassova, Burkhardt, & Mégard, 2007 ; Magnusson, Hanson, & Borg, 2004). Dans une étude par entretiens s'intéressant aux « points de vue » de différents profils de concepteurs oeuvrant dans le domaine des technologies pour la formation (voir Burkhardt & Wolff, 2002 ; Burkhardt & Wolff, 2003; Wolff, Burkhardt, & De la Garza, 2005), la comparaison des discours portant sur des projets réels de conception de dispositifs

⁴ Le terme « ubiquité » renvoie à plusieurs définitions dont deux ont une application complémentaire dans le champ des technologies émergentes : d'une part, il s'agit de la « faculté d'être présent physiquement en plusieurs lieux à la fois », laquelle qualifie donc l'ubiquité du point de vue de l'utilisateur ; d'autre part, il s'agit du « caractère de ce qui existe partout, se rencontre dans tous les lieux du monde », qui caractérise par conséquent l'ubiquité du point de vue des systèmes. Ce second sens, centré sur la technologie, est celui majoritairement entendu dans les communautés développant les technologies dites d'informatique « ubiquitaire » (ubiquitous computing), omniprésente (pervasive), ou plus récemment encore l'intelligence ambiante (ambient intelligence).

de simulation pour la formation confirme une telle prégnance de l'artefact dans ses dimensions d'ingénierie technique en même temps qu'elle nous a fait suggérer un possible effet du degré de maturité de la technologie concernée. Ainsi, selon que le concepteur appartienne au domaine de la réalité virtuelle, discipline et domaine technologique jeune, ou à celui beaucoup plus mature des simulateurs, les points de vue affichés s'opposent simultanément sur deux niveaux : d'une part, les objets centraux du discours concernent principalement l'interaction, l'immersion et les interfaces, dans le domaine des technologies émergentes (i.e. ici la réalité virtuelle), alors que l'on trouve une centration sur les tâches, les scénarios et enfin les avantages et les limites des simulateurs, dans le deuxième cas ; d'autre part, le discours est plus ancré dans l'argumentatif et la subjectivité, pour les premiers, tandis qu'il est plus ancré sur l'action et l'objectivité pour les seconds. On notera avec intérêt l'évolution forte de la communauté de la réalité virtuelle, depuis cette étude et au moins en France, vers la mise au centre des besoins de l'utilisateur et de son activité dans une majeure partie des projets de recherches.

2.1.3 Un matériau plastique pour une conception rapide et itérative s'appuyant sur la participation des utilisateurs

Une caractéristique forte du domaine est probablement le caractère éminemment « plastique » du matériau « logiciel » (Burkhardt & Sperandio, 2004), du point de vue des possibilités d'action et d'usage, dans le domaine de la recherche - comme dans le domaine de l'intervention. Cette caractéristique propre au domaine technologique se combine avec le fait que l'informatique - plus largement le domaine des technologies émergentes - est probablement aujourd'hui l'un des domaines où les utilisateurs participent en nombre à la conception, certes à des degrés et des titres divers : tests, études de satisfaction, bêta-tests, associations d'utilisateurs.

Les outils de maquettage et de prototypage permettent en effet, à un moindre coût, de visualiser et de simuler l'apparence et le fonctionnement des systèmes, même à des phases très précoces, autorisant la réitération rapide d'évaluations tout au long du processus, voire la mise en situation des utilisateurs avant les étapes finales de la conception. De surcroît, les maquettes successives offrent une représentation concrète pour communiquer avec les utilisateurs et à l'intérieur du projet, en même temps qu'elles constituent un guide pour la spécification des versions successives ; le risque est d'ailleurs qu'elles se substituent à la spécification et à l'expression de la logique de conception. Le pendant de cette plasticité est le rythme extrêmement accéléré des changements de versions, susceptible d'engendrer lui-même des difficultés. Par exemple, cela encourage l'adoption d'une démarche restreinte à la seule stratégie par essais et erreurs. Or, d'une part, figer une version pour l'évaluer devient difficile et les recommandations ou propositions d'amélioration peuvent ne plus s'appliquer, le système ayant évolué entre temps. D'autre part, la démarche guidée par le seul tâtonnement s'affranchissant de cadres et de théories condamne la conception et l'ergonomie à échouer dans l'élaboration d'un corps de connaissances propres.

Cette plasticité a un intérêt du point de vue du chercheur. Elle rend possible l'expérimentation de systèmes aux formes et aux paradigmes variés, voire de situations inédites. Des exemples actuels concernent les travaux sur l'immersion dans les environnements virtuels, la conception à distance, l'interaction cerveau-ordinateur (« Brain-Computer Interaction »), etc. Elle offre la possibilité de simuler des situations d'usage et d'observer l'interaction et l'activité qui lui sont associées chez un ou plusieurs utilisateurs, tout en contrôlant à un niveau de plus en plus important les conditions et l'environnement de cette activité, en même temps que le comportement des outils.

2.2 Deux domaines illustratifs des technologies émergentes

Parmi les technologies en cours de mise au point, deux domaines m'ont paru particulièrement représentatifs des évolutions de l'informatique. Il s'agit d'une part des technologies visant à créer un « lieu » virtuel d'interaction et de coopération entre personnes distantes, avec un intérêt récent en particulier pour les communautés virtuelles qui se construisent spontanément autour d'un objectif commun comme dans les jeux en lignes ou la conception de logiciels libres. Il s'agit d'autre part des technologies visant l'immersion et l'interaction d'une ou plusieurs personnes dans des mondes partiellement ou intégralement « virtuels », numériques, artificiels. Ces dernières sont généralement associées au domaine dit de la réalité virtuelle, mixte ou encore augmentée.

Ces deux domaines illustratifs sont brièvement présentés à la suite.

2.2.1 Technologies d'assistance à la coopération dans les communautés virtuelles

Le terme de communauté accolé à divers qualificatifs tels « virtuelle » (Rheingold, 1993) ou « en ligne » (de Souza & Preece, 2004) empreinte à l'origine au vocabulaire sociologique (Welmann & Gulia, 1999) pour décrire les interactions en masse observées avec le développement d'Internet (Conein, 2004). Les travaux menés en ergonomie sur cette thématique s'inscrivent principalement dans le champ des études sur les environnements informatisés pour le travail coopératif. Les premières recherches ont porté sur les systèmes de conférences à distance, exploitant le son puis l'image. Avec la généralisation des technologies numériques, ces systèmes de communication médiée ont été enrichis d'outils visant à offrir la possibilité de partager des espaces communs de travail, voire de co-agir sur des objets. Plusieurs typologies ont été alors proposées, fondées sur les caractéristiques fonctionnelles (par ex. communication, partage, coordination) ou sur les spécificités techniques des dispositifs. Une catégorisation classique distingue par exemple les environnements dits synchrones de ceux dits asynchrones (Ellis, Gibbs, & Rein, 1991). Dans les premiers, les différents participants, localisés à distance, interagissent et manipulent des données simultanément. Inversement dans les environnements asynchrones, les actions des participants se font dans des temps différents.

Par la suite, le centre d'intérêt des études a été d'évaluer et d'améliorer certaines dimensions de l'activité collective entre utilisateurs distants. Il a été montré, par exemple, que les contraintes technologiques entraînent une perte importante pour la conduite de l'interaction, dès lors que l'interaction est médiée (Olson & Olson, 2000). Les travaux ont ainsi mis en exergue la nature multimodale et multidimensionnelle de la communication (geste, direction et durée du regard, mimiques, attitudes corporelles, prosodie, etc.) incluant la gestion de l'espace dans l'interaction (codification culturelle et exploitation des distances et des espaces corporels et péricorporels, rapprochement ou éloignements entre deux interlocuteurs, coréférence). La rupture de l'espace physique qui n'est alors plus partagé (à laquelle vient éventuellement s'associer une rupture temporelle), s'accompagne de modifications des stratégies et de l'apparition de surcoûts ou d'effets indésirables pour la conduite des activités au cours de la collaboration. On notera que dans le domaine de la formation, de nombreux travaux sur l'apprentissage à distance ont été réalisés sur la question de la collaboration (voir par ex. Dillenbourg, Baker, Blaye, & O'Malley, 1996).

Récemment, les recherches ont visé à mettre en évidence les formes de coopération engendrées par ces nouveaux dispositifs, en particulier dans le contexte de communautés se construisant de façon relativement spontanée autour d'objectifs ou de valeurs communs, par exemple pour ce qui est de concevoir des logiciels « libres ». Les recherches que j'ai menées initialement dans le cadre d'un projet de coopération France-Berkley et poursuivi dans le cadre de la thèse de F. Barcellini codirigée avec F. Détienne constituent une illustration de cet intérêt récent pour une approche proposant de coupler à la fois la dimension cognitive, interactionnelle et sociale pour comprendre l'activité dans ces formes d'interaction sociales exploitant Internet (Barcellini, Détienne, & Burkhardt, 2005 ; Barcellini, Détienne, Burkhardt, & Sack, 2005a ; Barcellini, Détienne, Burkhardt, & Sack, 2008 ; Sack et al., 2006).

2.2.2 Technologies de la réalité virtuelle, mixte et augmentée

Depuis une vingtaine d'années, plusieurs courants de recherches technologiques se sont penchés sur diverses variations concernant l'association d'éléments du monde réel et d'éléments simulés informatiquement. Les terminologies revendiquées par ces courants témoignent de la dominance plus ou moins grande de l'un ou l'autre de ces pôles : réalité virtuelle, virtualité augmentée, etc. Les termes de Réalité Virtuelle et de Réalité mixte sont probablement parmi les plus usités et représentatifs de ces technologies aujourd'hui. Le lecteur pourra en trouver un panorama dans différents manuels (Fuchs & Moreaux, 2006 ; Stanney, 2002).

Les termes de « Réalité virtuelle » (RV) se réfèrent généralement aux recherches nées au début des années 1970 dont l'une des principales préoccupations est l'obtention d'une interaction plus naturelle par l'intermédiaire de périphériques et d'interfaces multimodales de navigation et de manipulation en trois dimensions (casques ou écrans 3D, gants de manipulation, systèmes avec retours d'effort, etc.) et/ou de communications à distance médiées (MOO, MUD etc.). Cette dénomination « réalité virtuelle » correspond à la traduction littérale de l'expression « virtual reality » proposée par VPL Research, entreprise spécialisée dans les dispositifs d'immersion, à des fins de communication et de marketing lors d'un salon professionnel (Tisseau, 2001). L'expression est mise tantôt au singulier (Burdea & Coiffet, 1993 ; Fuchs, Moreau, & Papin, 2003), tantôt au pluriel (Cadoz, 1994). D'autres termes tels que « cyberspace », « environnement synthétique », « monde numérique » ou « réalité artificielle » ont été proposés pour remplacer cette formule

ambiguë et critiquable à plusieurs titres (voir en particulier les discussions dans Cadoz, 1994 ; Tisseau, 2001), sans succès jusqu'ici.

Ma première recherche dans ce domaine a concerné la contribution de l'ergonomie à la mise au point d'un prototype d'environnement virtuel pour la formation des conducteurs de ligne grande vitesse, développé en partenariat par la SNCF et l'Ecole des Mines de Paris (voir par ex. Burkhardt, Lourdeaux et al., 1999 ; Burkhardt, Lourdeaux et al., 2003 ; Lourdeaux, 2001). La question initiale concernait la conception et l'évaluation ergonomiques de moyens d'interaction intuitifs pour permettre à un utilisateur apprenant de réaliser un scénario de dépannage dans un environnement virtuel à l'échelle 1 (voir Figure 1). L'objectif de l'application était d'acquérir la procédure. D'autres questions ont émergé rapidement, par exemple sur la place et l'outillage du formateur avec ces nouveaux outils, ou encore sur les relations entre l'activité réelle – cible de l'acquisition - et l'activité développée au moyen de l'environnement virtuel. Peu de données existaient à cette époque tant sur l'efficacité de la réalité virtuelle que sur les critères associés à l'interaction avec ces nouveaux environnements, a fortiori dans un contexte d'utilisation pour l'apprentissage.



Figure 1. Projet FIACRE développé par la SNCF en collaboration avec l'école des Mines de Paris entre 1997 et 2001

Les termes de « Réalité Augmentée » (RA) ont été introduits plus récemment, au début des années 1990 (Caudell & Mizell, 1992) afin de désigner une forme spécifique d'interaction humain-machine (IHM) fondée sur l'association sémantique et spatiale d'objets réels et d'objets générés par un ordinateur. L'idée d'augmentation renvoie ainsi à l'enrichissement supposé de l'information véhiculée par les objets virtuels, par référence aux seules informations accessibles à l'utilisateur dans l'environnement immédiat du monde réel. Les technologies de RA, à la différence de celles de réalité virtuelle (RV), ne visent pas une substitution du monde réel par une analogie virtuelle. Critiquable d'un point de vue lexical et conceptuel, la dénomination « Réalité Augmentée » a été progressivement précisée, étendue ou remplacée par une multitude d'autres dénominations telles que « réalité améliorée » (*enhanced reality*, Ryan, Pascoe, & Morse, 1998), « réalité médiée » (*mediated reality*, Mann & Barfield, 2003), « réalité mixte », « virtualité augmentée » (*mixed reality, augmented virtuality*, Drasic & Milgram, 1996). Le premier projet dans le domaine de la Réalité Augmentée auquel j'ai participé consistait en la mise au point d'un prototype pour la formation des techniciens de maintenance véhiculaire, dans le cadre d'un partenariat avec le CEA et Renault, lors du master recherche puis de la thèse de Margarita Anastassova co-dirigée avec Jean-Claude Sperandio. La question initiale était d'évaluer la faisabilité et le cas échéant d'orienter le développement d'un dispositif de RA pour l'assistance

des mécaniciens en garage à la réparation des nouveaux modèles de véhicules. Certaines études réalisées dans ce contexte sont présentées plus loin dans ce mémoire (voir en particulier § 3.4.2.3).

On peut considérer que la dénomination « Réalité Mixte » (RM) représente aujourd'hui cet ensemble de technologies qui induisent de nouvelles formes d'interaction humain-machine et introduisent des évolutions potentielles dans bons nombres d'activités humaines. Les systèmes à base de technologies de réalité mixte exploitent actuellement quatre catégories de dispositifs d'interaction : les dispositifs de capture de position et de mouvement (capteurs, gant, combinaison, etc...) ; les dispositifs de présentation visuelle (grand écran, casque, etc...) ; les dispositifs de retour proprioceptifs et cutanés (toucher, chaleur, etc...) ; les dispositifs d'entrée et de présentation sonore (son spatialisé, reconnaissance vocale, etc...). En sus, dans le cas des systèmes apparentés à la réalité augmentée, il vient s'ajouter une caméra filmant la scène visionnée par l'utilisateur, afin de fournir une entrée pour le « calage » des entités virtuelles avec le monde réel. 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. Les fondements de l'ensemble de ces technologies résident essentiellement dans l'aspiration de créer des interfaces "intuitives" et faciles à utiliser (Anastassova, Burkhardt, Mégard, & Ehanno, 2007 ; Billinghurst, Kato, & Poupyrev, 2001).

Outre le champ des loisirs, ces technologies sont majoritairement développées dans quatre grands champs d'application :

- le domaine médical avec, en dehors de la formation, l'immersion thérapeutique et l'assistance à la chirurgie (voir par exemple Dubois, 2001 ; Satava & Jones, 2002) ;
- la formation professionnelle, à travers deux grandes approches : (a) la mise en situation et l'interaction avec des objets, des personnages et/ou un environnement simulé (pour une synthèse concernant cette direction, voir par ex. Burkhardt, Lourdeaux, & Mellet d'Huart, 2006 ; Burkhardt, Lourdeaux et al., 2003) ; (b) l'assistance en juste à temps par fourniture d'information pour aider l'utilisateur dans des tâches de diagnostic, ou pour le guider dans une procédure, par ex. tâches de montage/démontage (pour une synthèse des résultats et des travaux actuels dans cette direction d'application, voir par ex. Anastassova, 2006 ; Anastassova, Burkhardt, Mégard et al., 2007) ;
- la discussion ouverte et la socialisation à l'intérieur d'une « communauté», par ex. environnements multi-utilisateurs en ligne, MUD⁵'s, MOO⁶, (voir Bruckman & Resnick, 1995), environnements virtuels collaboratifs (EVC, voir par ex. Churchill, Snowdon, & Munro, 2001), etc. ;
- la conception, également selon deux principales approches : (a) le prototypage virtuel, correspondant plutôt à des systèmes immersifs permettant la visualisation d'objets ou de lieux en trois dimensions à partir de données CAO (par ex. Thouvenin, Jessel, Bourdot, De Bonnefoy, & Laborie, 2006) ; (b) les tableaux/bureaux et autres espaces augmentés, offrant le partage d'applications et de fonctionnalités spécifiques (voir Chalon, 2004 ; Davies, 2002 ; Shewchuk, Chung, & Williges, 2002).
- La recherche et la visualisation scientifiques, où il s'agit de présenter et d'organiser l'accès à une masse généralement importante de données dans le cadre d'une activité individuelle de recherche et d'extraction d'information (par ex. génome, « docking » de molécule (Férey et al., 2009)) et plus récemment de la coopération entre scientifiques.

2.2.3 Convergence des deux domaines : vers des espaces virtuels collaboratifs multimodaux

Ces deux domaines technologiques de la coopération à distance et de la réalité mixte tendent à se rejoindre aujourd'hui. Il y a un fort développement, en parallèle, de populations d'utilisateurs formant de façon spontanée des « communautés » virtuelles autour de valeurs et de centres d'intérêts communs tels l'activité professionnelle, le jeu, la citoyenneté etc. Initialement très centrés sur l'usage individuel, les travaux sur les Réalités Mixtes esquiscent de plus en plus une évolution vers l'assistance à l'activité dans des collectifs. Les questions de recherches ouvertes par la conception d'environnements virtuels collaboratifs constituent ainsi un thème majeur d'investigation aujourd'hui. Une discussion étayée de ces évolutions et des perspectives pour l'ergonomie cognitive est proposée dans Burkhardt (2007).

Deux de mes recherches récentes illustrent cette évolution.

⁵ Accronyme pour Multi-User Dungeon, environnement multi-utilisateurs temps réel exploitant une interface textuelle

⁶ Accronyme pour MUD Orientés Objets, par allusion au langage utilisé pour coder et étendre certains MUDs (par ex. LambdaMOO (Curtis & Nichols, 1993).

La première concerne l'usage collectif à distance d'un environnement d'aide à l'esquisse en conception architecturale dans le cadre d'un projet impliquant l'INRIA, France Telecom R&D et l'Université de Liège. Le Bureau Virtuel de Conception (BVC ; cf. Figure 3) est un espace de travail de Réalité Augmentée spécialement conçu pour la conception architecturale préliminaire sur base d'esquisses. Il est composé d'une table de travail en bois de format A0, d'un stylo électronique et d'un système de projection de haute définition (pour plus de détails, voir Safin, Boulanger, & Leclercq, 2005). Sur le BVC est implanté le logiciel EsQUIsE, logiciel d'interprétation de croquis de conception architecturale préliminaire (Juchmes & Leclercq, 2004). Le paradigme à la base de la conception de ce système matériel et logiciel est celui de la technologie *invisible* où l'interface doit disparaître de la conscience de ses utilisateurs.

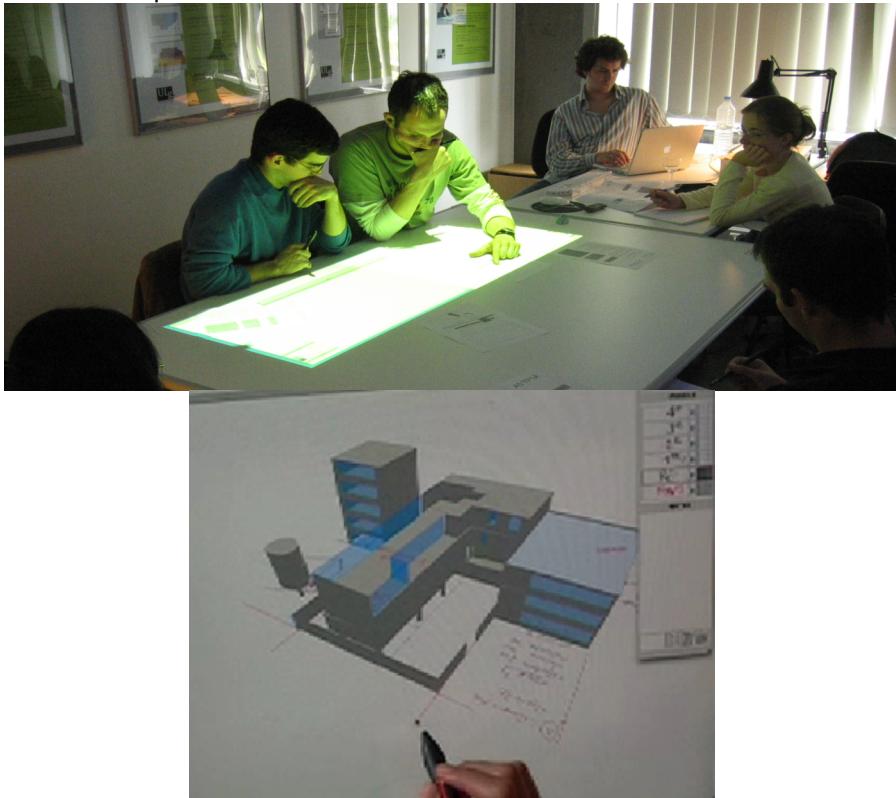


Figure 2. Bureau Virtuel de Conception avec deux architectes utilisant le logiciel EsQUIsE (g) ; traduction 3D d'une solution développée au cours d'une session de travail (d)

Cet environnement vise à offrir aux architectes une surface de travail digitale qui permet de faire des esquisses à main levée (à l'aide d'un stylet) tout en maintenant la liberté créative liée à un espace de travail proche d'une table à dessin traditionnelle. Le logiciel EsQUIsE permet, sur base d'esquisses à main levée, d'obtenir différents indicateurs permettant d'évaluer le travail de conception préliminaire, notamment une visualisation en trois dimensions (3D) du bâtiment (Figure 2). Dans ce contexte technologique, l'objectif était de proposer une méthode pour évaluer l'effet de la médiatisation sur l'activité de conception et sur différentes dimensions de la collaboration (Burkhardt, Détienne, Moutsinga-Mpaga et al., 2008a ; 2008b). Une synthèse de ces dimensions est donnée plus loin (voir chapitre 3, § 3.3.6).

La seconde illustration concerne les évolutions pressenties vers un mode d'usage collectif d'environnements virtuels exploitant plusieurs canaux sensoriels pour l'exploration des configurations de liaisons entre molécules (Figure 3). Il s'agit d'un projet ANR développé en partenariat avec le LIMSI-CNRS, l'EBGM et l'entreprise Haption (Férey et al., 2008 ; 2009). Très rapidement, en effet, la demande des utilisateurs potentiels a évolué vers un usage collectif suite à l'utilisation du prototype en cours d'évaluation aujourd'hui.

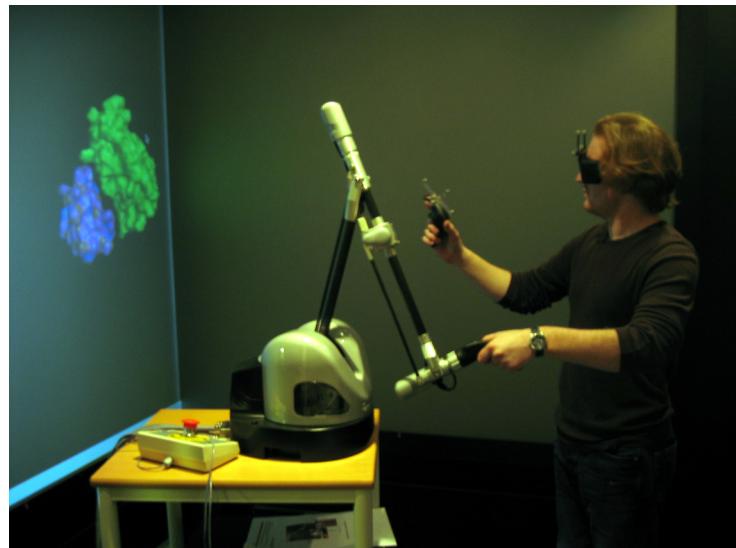


Figure 3. Prototype d'EV multimodal pour l'amarrage de molécules développé lors du projet CORSAIRE (Photo LIMSI CNRS)

2.3 La faible prise en compte de l'apprentissage dans l'ergonomie des technologies émergentes

2.3.1 Un détour par quelques clarifications concernant la notion d'apprentissage

Par *apprentissage*, nous nous référons aux processus de construction ou de réorganisation des connaissances mis en œuvre soit par des sujets individuels, soit à l'intérieur d'un collectif, voire à l'échelle d'un système sociotechnique plus large tel qu'un département ou une entreprise. On parle dans ce dernier cas *d'apprentissage organisationnel*. L'apprentissage renvoie par conséquent à des phénomènes complexes tant au niveau cognitif que social, difficiles à localiser dans le temps et dans l'espace, mais qui se traduisent par des modifications observables du comportement des sujets (utilisateurs ou opérateurs) de telle sorte que leur comportement soit de mieux en mieux adapté à l'atteinte de leurs objectifs, cela de façon durable.

Cette définition, large à dessein, a deux conséquences principales.

La première est triviale pour le chercheur dans le domaine de l'apprentissage et du développement des compétences. Elle doit parfois être rappelée dans le contexte de la conception et de l'innovation technologique : l'apprentissage, en tant que processus, ne se confond pas avec les ressources et les moyens qui sont mis en place pour atteindre des objectifs d'acquisition donnés. Ces ressources et ces moyens, généralement désignés par le terme de « formation », d'enseignement ou encore d'éducation, se réfèrent en effet à un certain type de situation « contexte » clairement localisée dans l'espace et dans le temps (par ex. date, contenu, matériel, méthode, durée, acteurs participants, scénario) à partir de laquelle un processus d'apprentissage est réputé prendre place. Le lien entre « apprentissage » et « formation » n'est donc ni de l'ordre de l'implication systématique (il se peut qu'aucun des apprentissages souhaités ne prenne place au cours ou à l'issue d'une formation donnée, au travers de l'usage d'une ressource hypertexte préconisée, etc.), ni de l'ordre de la condition nécessaire (des processus d'apprentissage interviennent dans bien d'autres situations que la formation, à commencer par celles vécues au travail et dans la vie hors travail).

La seconde conséquence est que les processus d'apprentissage auxquels l'analyse de l'activité humaine est confrontée sont variés, comme les situations couvertes par les études ergonomiques. L'éventail des situations visées par la conception - notamment technologique - met en effet en scène des facteurs, des objectifs et des processus variés du point de vue de l'apprentissage, dans les situations de formation évidemment, mais également plus largement dans les nombreuses situations d'activité : apprentissage d'une procédure sur simulateur, prise en main de la nouvelle version d'un logiciel, apprentissage d'un métier par tutorat/compagnonnage, apprentissage opportuniste, apprentissage « sur le tas » de l'utilisation d'un traitement de textes, etc.

L'objet de cette partie n'est donc pas d'exposer l'ensemble des théories concernant l'apprentissage et le développement cognitif. D'ailleurs, la variété et le grand nombre de théories et de modèles psychologiques concernant l'apprentissage et le développement des connaissances ou des compétences rendraient l'exercice définitivement hors du sujet du présent mémoire. On peut s'en convaincre en consultant par exemple la base de données Theory Into Practice (TIP)⁷ qui recense et organise⁸ un sous-ensemble de 53 théories et modèles en lien avec la psychologie des apprentissages et l'éducation, relevant d'approches et de niveaux de grain variés (par ex., psychologie comportementaliste, cognitive, sociale, de l'éducation etc.) et dont la modélisation est plus ou moins spécifiquement inscrite dans des domaines eux-mêmes variés (par ex. apprentissage procédural, mathématique, langue, etc). Il existe par ailleurs de bons ouvrages en la matière, et en particulier dans le domaine des technologies d'apprentissage ou encore dans le domaine de la formation professionnelle.

Au-delà de cette diversité des modèles et des théories disponibles, George (1983) souligne cinq principes à propos desquels il semble exister un large consensus - à défaut d'unanimité :

- (1) il existe plusieurs mécanismes d'apprentissage, certains plus généraux que d'autres, i.e. se manifestant à travers un plus ou moins grand nombre de situations et de populations de sujets ;
- (2) les possibilités et les modalités d'apprentissage dépendent du niveau cognitif et de l'équipement sensoriel et moteur du sujet, car celui-ci conditionne les savoirs et les savoir-faire disponibles ;
- (3) l'apprentissage dépend du sous-ensemble des savoirs et savoir-faire disponibles effectivement mobilisé par le sujet dans une situation donnée. En d'autres termes, différents facteurs spécifiques à une situation peuvent contrecarrer l'utilisation d'instruments cognitifs pourtant utilisés dans une autre situation ;
- (4) il peut exister éventuellement plusieurs cheminements possibles pour réaliser une acquisition définie ;
- (5) il faudrait considérer certains facteurs traditionnels (par ex. sanction de la réponse) moins comme un déterminant de l'apprentissage lui-même, que comme un déterminant des activités sensori-motrices et cognitives mises en jeu par le sujet dans la situation d'apprentissage.

Les typologies des processus d'apprentissage s'appuient aujourd'hui sur plusieurs propriétés distinctives.

Une première distinction concerne les dimensions implicite vs. explicite de l'apprentissage. L'apprentissage implicite désigne (Perruchet & Nicolas, 1998) un mode d'adaptation dans lequel le comportement du sujet est sensible à la structure de la situation contexte, sans que cette adaptation ne soit imputable à l'exploitation intentionnelle de la connaissance explicite de cette structure. En d'autres termes, cela caractérise les aspects de l'adaptation qui restent inaccessibles à l'introspection, sans exclure l'existence concomitante d'une part analytique, intentionnelle et explicite dans l'acquisition. L'apprentissage explicite correspondrait à l'adaptation par modification du contenu ou de l'organisation des connaissances explicites, c'est-à-dire à des situations où une règle évoquée est généralisée, particularisée ou infirmée à partir de l'observation, de l'analyse ou de l'expérimentation. Les deux modes d'apprentissage coexistent et interagissent dans les situations « naturelles » d'apprentissage.

L'apprentissage par l'action (en angl. *learning by doing*) et l'apprentissage par instruction (en angl. *learning by being told*) désignent deux formes de situations communément opposées et les processus associés de l'acquisition de connaissances. Cette distinction peut être caractérisée par deux dimensions (Richard, 1990) : la dimension factuel-abstrait et la dimension logique interne/ logique d'utilisation. Dans l'apprentissage par l'action, la connaissance est construite progressivement sur la base du contexte spécifique de la tâche, le processus consistant à traiter des informations factuelles, particulières à la situation, lesquelles sont structurées plutôt selon le problème en cours que selon la logique interne au domaine considéré. Les connaissances sont alors principalement orientées vers l'utilisation et les situations spécifiques à traiter. Dans l'apprentissage par instruction, la connaissance à acquérir est généralement présentée de façon plus abstraite selon une logique interne de cohérence entre d'une part la connaissance supposée déjà acquise par le sujet et d'autre part l'information nouvellement présentée qui doit y être intégrée.

Particulièrement dans l'ergonomie francophone, c'est moins la notion d'apprentissage (est-ce l'effet d'une connotation trop behavioriste ?) que celle du développement dynamique des compétences qui est alors mise en avant dans une tradition théorique ancrée à la suite des théories piagétienne. On passe alors d'une conception de la notion de compétence comme « savoir exécuter le bon mode opératoire » à « savoir

⁷ <http://tip.psychology.org/>

⁸ version 2.6, may 2006

comprendre et s'adapter » à des situations variées, voire à des situations nouvelles que l'opérateur n'a jamais rencontrées (Pastré, 2005). En témoignent divers ouvrages ou articles qui s'emploient à délimiter le concept de compétences, notamment en le situant clairement dans la démarche d'analyse ergonomique de l'activité (Bouthier, Pastré, & Samurcay, 1995 ; Gaudart & Weill-Fassina, 1999 ; Leplat, 1991 ; Minet & Parlier, 1996 ; Samurcay & Pastré, 1998). Pour une synthèse, voir par exemple Weill-fassina et Pastre (2004). Il semble que le terme d'apprentissage soit moins banni des questions de formation dans une ergonomie « plus anglo-saxonne », voir par exemple Bainbridge (1993) ou Patrick (1992).

Dans l'une de ses acceptations, la notion de régulation, exploitée en ergonomie pour guider l'analyse de l'activité (pour une synthèse voir Leplat, 2006), est également associée à certains processus d'apprentissage. Dans une perspective sociologique, la régulation correspond aux processus de production et d'adaptation des règles d'action situés à l'articulation de l'individuel et du collectif. Pour une bonne part, ces règles constituent à un instant donné la connaissance distribuée à travers l'organisation. L'explicitation et la capture de cette connaissance opérationnelle et technique constituent l'un des enjeux de l'apprentissage organisationnel. Un tel processus d'acquisition renvoie à des mécanismes d'abstraction et de capitalisation du savoir opérationnel, lesquels reposent sur une activité réflexive, c'est-à-dire « l'activité par laquelle un sujet (ou un groupe de sujets) prend son propre travail comme objet de réflexion (Falzon & Teiger, 1999 ; Mollo & Falzon, 2004). Dans une perspective plus centrée sur l'individu, la notion d'activité réflexive pourrait ainsi renvoyer à une forme d'apprentissage autorégulé comme le suggère Leplat (2006), c'est-à-dire une activité d'apprentissage ou de perfectionnement intentionnel où « le sujet est orienté non seulement vers la tâche à accomplir mais aussi vers la manière dont il l'accomplit » (Leplat, 2006, p 20). Falzon et Teiger (1999) soulignent d'ailleurs le rôle fonctionnel d'une telle activité réflexive pour la construction des savoirs professionnels, d'une part, et son rôle méta-fonctionnel du fait de cette orientation non seulement vers le résultat mais aussi vers le contexte et la procédure qui a permis de l'atteindre. Leplat (2006) souligne que ce type d'activité suppose que le sujet (a) peut améliorer lui-même sa propre capacité à apprendre par un usage sélectif de stratégies métacognitives et motivationnelles ; (b) est à même de choisir, structurer et même créer de façon proactive ses environnements d'apprentissage favorables ; (c) peut jouer un rôle significatif dans le choix de la forme et de la quantité d'instructions dont ils ont besoin.

Je conclurai ce très bref panorama en soulignant une dernière spécificité de l'ergonomie relativement aux études psychologiques traditionnelles sur l'apprentissage. Dans ces dernières, le choix des facteurs et des scénarios d'études sont principalement liés aux objectifs théoriques - en général la mise à l'épreuve d'un modèle ou d'une hypothèse découlant d'une théorie - en même temps que la réalisation d'un contrôle expérimental suffisant. En ergonomie, le choix des facteurs est intrinsèquement lié à la situation actuelle ou future : il s'agit de comprendre l'activité actuelle ou d'anticiper sur l'activité future la plus probable. Certes, la nécessité d'un contrôle expérimental y est également vraie dans la mesure où « la clef de voûte de toute la méthodologie ergonomique est la méthode expérimentale (...) [car] l'ergonomie n'a pas d'autre moyen pour élaborer un corps de connaissances propres » (Sperandio, 1980, p. 61). Cependant, la situation et le choix des facteurs doivent respecter l'écologie de la situation sur laquelle le chercheur et/ou l'intervenant veulent collecter des données. Ainsi, afin d'appréhender la dimension d'apprentissage dans une activité, les critères pour orienter le choix vers telle ou telle théorie ne sont pas liés à la seule élégance ou à la seule validité de ladite théorie (ni du reste à sa prémonition à un instant donné à l'intérieur de la communauté). Entre autres critères importants, il en est un central qui est la proximité entre l'activité ciblée dans la situation concernée par l'étude et les paradigmes associés à cette théorie. Un second critère est la capacité d'une telle théorie à produire des données et des interprétations susceptibles de fonder des préconisations.

2.3.2 Une posture dominante en ergonomie des nouvelles technologies : limiter voire éviter l'apprentissage (de l'interface)

Il est un paradoxe dans le domaine de l'innovation technologique. La nécessité de nouveaux apprentissages pour l'être humain s'explique en grande partie par l'extension et la fréquence toujours plus rapide de l'introduction et du renouvellement des « nouvelles » technologies, tant dans la vie professionnelle que dans la vie hors travail et les loisirs. Or dans le même temps, l'apprentissage reste une dimension peu prise en compte dans la conception et l'évaluation des systèmes interactifs et autres technologies en cours d'émergence, i.e. celles - non mature aujourd'hui- que nous aurons à utiliser demain. En dehors des travaux sur les nouvelles technologies dédiées à la formation, la dimension apprentissage est abordée au travers de la seule notion d'apprenabilité (learnability), ce qui restreint de fait l'apprentissage considéré au seul périmètre de l'interface et de l'interaction. Quelques auteurs, peu nombreux il est vrai, ont milité néanmoins pour que l'apprentissage devienne une fonction importante associée à la conception de l'Interaction Humain-

Machine⁹. Trois approches de la conception des systèmes informatisés traitent ainsi explicitement de la question des apprentissages et du développement des compétences, quoique de façon différente :

- le minimalisme (en angl. *minimalism*, Anson, Draper, & Carroll, 1998; Carroll, 1990) qui vise à favoriser la prise en main et l'apprentissage par l'action d'un dispositif informatique par ses nouveaux utilisateurs ;
- la conception centrée sur l'apprenant (Guzdial et al., 1995 ; Soloway, Guzdial, & Hay, 1994) qui propose un cadre d'analyse pour adapter progressivement les outils informatisés au développement des compétences des utilisateurs professionnels, et enfin,
- l'approche de la conception des interfaces écologiques de l'ingénierie cognitive (Vicente, 2002 ; Vicente & Rasmussen, 1990).

Plusieurs hypothèses peuvent être proposées pour expliquer une telle éclipse de la dimension d'apprentissage d'une partie du champ ergonomique. Celle-ci provient peut-être de la focalisation sur les seuls aspects d'interaction entre l'utilisateur et le système, et en parallèle la dimension de l'utilisabilité majoritairement privilégiée par opposition à d'autres dimensions, comme l'utilité par exemple (voir par ex. la discussion développée dans Burkhardt & Sperandio, 2004). Ainsi un principe ergonomique communément préconisé dans la communauté s'intéressant à l'Interaction Humain-Machines (IHM) est de minimiser l'effort d'apprentissage pour l'utilisateur, voire d'éviter toute nécessité d'apprentissage : une interface est d'autant plus « apprenable » qu'elle ne nécessite pas d'être apprise. Comme le résume dans une formule éclairante Sperandio (1993) : « l'opérateur a ses propres finalités, mais aussi ses habitudes, ses savoirs et ses savoir-faire que l'on essaie de protéger, ne serait-ce que parce que tout apprentissage est à la fois coûteux et risqué ». Ce principe se traduit par différentes directions théoriques ou pratiques qui tendent implicitement vers le même objectif qui est la minimisation sinon la suppression de la nécessité pour l'utilisateur d'avoir à apprendre les modalités d'utilisation d'un nouvel outil.

Un élément d'explication possible réside aussi dans l'ancrage fort, ces dernières années, d'une part importante de l'ergonomie dans la psychologie, en particulier dans son courant le plus cognitiviste. Or, d'une part, la psychologie cognitive, dans son approche la plus orientée « traitement de l'information », conçoit l'apprentissage principalement sous la forme de la mise en mémoire d'information nouvelle (George, 1983, p. 14). D'autre part, la construction des situations d'études exploite de façon dominante un paradigme de causalité plutôt linéaire, dans lequel la recherche d'effets selon un plan factoriel classique amène, d'une part, à éliminer les éventuels effets « parasite » d'apprentissage et, d'autre part, à favoriser des études par comparaison plutôt que des approches développementales (l'apprentissage apparaît alors comme une variable invoquée : cf. les si nombreux plans de comparaison experts-novices).

Enfin, un autre élément d'explication possible est l'affirmation sans cesse réitérée d'une disparition supposée des difficultés d'apprentissage et d'utilisation des technologies émergentes sur le long terme, du fait de l'arrivée de nouvelles générations d'utilisateurs familiarisés très jeunes. Ce raisonnement est en partie fallacieux dans la mesure où il présuppose que la technologie n'évolue pas, la population d'utilisateurs devenant ainsi progressivement « alphabétisée » dans son ensemble. Or c'est souvent le constat contraire qui caractérise le développement technologique : une évolution rapide avec des changements parfois très marqués qui impliquent l'existence d'un décalage persistant du plus grand nombre des utilisateurs en ce qui concerne leurs connaissances a priori sur les systèmes qu'ils sont amenés à utiliser, en particulier chez les plus jeunes, les plus âgés ou chez les utilisateurs occasionnels.

2.3.3 Constance, réémergence et formes de référence à la dimension « apprentissage » en ergonomie

Même si cela semble souvent peu visible par la communauté centrée sur l'ergonomie informatique et l'interaction humain-ordinateur, notamment en France, l'apprentissage au travers de la contribution de l'ergonomie à la conception de la formation professionnelle est une facette constante de la discipline depuis sa création (voir par ex. Leplat, 1955 ; Ombredane, 1955). On en trouvera une trace dans diverses publications traitant pour l'essentiel de l'apport de l'analyse du travail à la question (par ex. Bisseret & Enard, 1970 ; De Montmollin, 1974 ; Gillet, 1973 ; Lacomblez, 2001 ; Leplat, 2002 ; Leplat, Enard, & Weill-Fassina, 1970 ; Patrick, 1992).

⁹ Voir la présentation et la discussion dans la partie synthèse « Utilisation et Apprentissage ».

2.3.3.1 L'analyse du travail et de l'activité, première contribution de l'ergonomie au champ de la formation professionnelle

Historiquement, l'analyse du travail en lien avec la conception de la formation professionnelle constitue - encore aujourd'hui - la première contribution majeure de l'ergonomie au domaine de la formation (voir à ce propos l'exemple de l'étude de Houyoux sur le poste des démouleurs de sucre rapporté par Ombredane (1955). L'analyse de l'activité peut avoir plusieurs cibles : le travail actuel, la population à former ou encore l'activité développée dans le cadre d'une situation de formation. Elle peut en outre répondre à plusieurs fonctions dans le contexte de la formation professionnelle comme comprendre, évaluer, ou encore proposer des évolutions et des adaptations. En termes de contributions remarquables, on peut distinguer trois groupes d'études de l'activité selon le contexte et les opérateurs concernés :

- **l'activité actuelle d'opérateurs considérés comme « experts » de la tâche, dans la situation réelle de travail.** Ce type d'étude constitue en effet l'un des fondements pour définir les objectifs, la méthode et le contenu de la formation¹⁰ pour des « nouveaux venus » ; il permet aussi de préciser l'activité réelle et les compétences à acquérir. On en trouve une illustration dans le travail d'Aubert (1999, 2000) où cet auteur met notamment en évidence la dimension collective comme l'un des déterminants majeurs de l'activité chez les peintres aéronautiques. Ce résultat a par exemple permis de pointer l'une des faiblesses de la formation existante, à côté de la non-prise en compte d'autres déterminants critiques de l'activité dans la construction des situations de pratique au cours de la formation ;
- **l'activité actuelle des opérateurs destinataires de la formation,** comme outil pour l'analyse des besoins et la mise en évidence des pistes les plus pertinentes pour améliorer la situation de travail et la formation, notamment s'il s'agit d'investir dans la conception d'une assistance technologique. Un exemple est développé dans ce mémoire, au travers des études de M. Anastassova dans le cadre de sa thèse (Anastassova, 2006; Anastassova & Burkhardt, 2009 ; Anastassova, Burkhardt, & Mégard, 2007 ; Anastassova, Burkhardt, Mégard, & Ehanno, 2005). Ce type d'études peut aussi être mené avec l'objectif de formaliser les représentations fonctionnelles/opératives des opérateurs. L'intérêt et l'usage d'une telle étude est là encore multiple : il peut permettre de spécifier des hypothèses sur les contenus informationnels à présenter et les traitements à assister dans le contexte de la formation, de fournir des interprétations des erreurs observées – par exemple dans le cadre d'un système de tuteur intelligent – ou encore de suggérer une métaphore facilitant la transposition progressive des connaissances pratiques vers de nouvelles compétences. On trouvera une belle illustration de cette approche dans les travaux de Boucheix (2003b) sur la mise au point d'un simulateur multimédia pour l'acquisition de la lecture de tableaux de charge chez les conducteurs de grues ;
- **l'activité d'opérateurs en situation de formation,** c'est-à-dire dans des situations dont l'environnement comme les tâches sont intentionnellement orientés vers l'obtention d'un apprentissage de la part des opérateurs/apprenant/formés/travailleurs. Une illustration se trouve par exemple dans l'étude de Durey et Pacaud (1960) sur des stagiaires apprenant la mécanographie. A partir d'une analyse de l'activité et des déterminants des erreurs constatées au niveau des cartes produites lors des exercices, les auteurs proposent une re-conception profonde de la formation existante ainsi qu'une modification du clavier utilisé pour l'apprentissage. De façon similaire aux interventions ergonomiques visant l'évaluation et l'amélioration des conditions de travail, l'analyse débouche sur des préconisations d'adaptation de la situation, à ceci près que la situation considérée est la situation d'apprentissage. On peut citer dans cette même direction, l'analyse psychologique de l'apprentissage de l'oscilloscope menée par Vermersch (1976) auprès de jeunes en formation professionnelle, l'apprentissage du dessin technique (Weill-Fassina & Rabardel, 1986), la programmation de robots pédagogiques (Rabardel, 1989), la formation de peintre aéronautique (Aubert, 2000).

Si l'ensemble des méthodes de l'analyse du travail permet d'obtenir des résultats exploitables pour la formation, des méthodes spécifiques d'analyse et de formalisation de la tâche de l'expert ont été développées avec l'objectif d'assister la conception de la formation. La plus connue de ces méthodes - l'une des plus anciennes - est probablement HTA (*Hierarchical Task Analysis*, Annett, Cunningham, & Mathias-jones, 2000 ; Annett & Duncan, 1967 ; Annett, Duncan, Stammers, & Gray, 1971). Cette approche vise non

¹⁰ Plusieurs de mes études entrent dans cette orientation: étude de l'activité et des difficultés de techniciens de maintenance automobile dans le cadre du Master recherche de M. Anastassova (Anastassova, 2003 ; Anastassova, Burkhardt, Mégard, & Ehanno, 2005) ; entretiens et recueils d'incidents auprès des intervenants dans des situations d'urgence dans le cadre du projet SAGECE (Girard, Delgouet, & Burkhardt, 2009), analyse de l'activité de chargement de conducteurs de matières dangereuses sur un site Seveso dans le cadre du projet V3S (Burkhardt et al., 2007 ; Burkhardt, Girard, Ben Ayed, & Lourdeaux, 2008 ; Burkhardt, Girard, Ben Ayed, Lourdeaux, & Niogret, 2009), analyse de l'activité et des difficultés dans l'organisation et la réalisation d'une tournée de maintenance industrielle dans le cadre du projet PERF RV2 (Couix & Burkhardt, 2007)

seulement à décrire la tâche mais aussi à éclairer différentes facettes des difficultés de sa réalisation comme l'identification des circonstances dans lesquelles les objectifs associés à la tâche sont activés, la réalisation de l'action proprement dite, ou encore les conditions indiquant l'atteinte du but (Annett & Duncan, 1967). Les difficultés peuvent résider dans un, deux voire ces trois aspects de la tâche, impliquant une approche de la formation différenciée. Par exemple, lorsque les circonstances sont perceptivement ou conceptuellement complexes, il faudra insister sur l'importance d'exercices de reconnaissances ou discrimination ; si ce sont les actions qui sont critiques, ce sont alors les règles opératoires, les heuristiques et la connaissance du fonctionnement du système qui seront à acquérir (Annett, 2004).

2.3.3.2 En retrait à partir des années 1970, la thématique formation et apprentissage revient à partir des années 1990

A la fin des années 1970 et dans les années 1980, les questions d'apprentissage et de formation apparaissent en retrait, au moins si l'on en juge par la façon dont cela est traité dans la littérature. La thématique de la formation professionnelle est par exemple absente de l'étude par questionnaires sur la représentation de l'ergonomie réalisée auprès des membres de la SELF à la fin des années 1970 (Faverge, 1976). De même, l'apprentissage et la formation ne font pas partie des thèmes abordés lors du colloque « l'Ergonomie au service de l'Homme au travail » organisé par la SFP deux ans plus tard dont l'une des intentions était de faire le point sur « comment, dans quelles conditions et selon quelles modalités l'ergonomie doit-elle être mise en œuvre et utilisée pour être au service de l'homme au travail » (Moulin, 1978).

Il faut attendre le début des années 1990 pour observer un regain d'intérêt pour les questions de formation (Gaillard, 1997 ; Teiger, Lacomblez, & Montreuil, 1997 ; Teiger & Montreuil, 1995). L'explication de cette nouvelle émergence de la double thématique formation et apprentissage peut se situer à de multiples niveaux :

- l'évolution rapide des métiers, des savoirs et des méthodes de travail, la formation professionnelle devenant partie intégrante du travail (Delgoulet & Marquié, 1998) ; des thématiques particulières émergent dans le même temps, telle la problématique du vieillissement, de la formation et de l'apprentissage ;
- la place croissante et le renouvellement rapide de la technique qui nécessite - réglementairement - d'associer à tout projet de conception la formation des opérateurs ; le caractère continu de l'innovation et de l'introduction de nouveautés technologiques constitue d'ailleurs l'une des sources majeures à l'origine des besoins de formation des personnes, tant sur les lieux de travail que dans la vie hors travail ;
- l'augmentation des régulations automatiques change en partie la nature des métiers : le diagnostic devient plus central dans l'activité de nombreux opérateurs par rapport à l'opération (Pastré, 2005). Une évolution récente est aussi le développement des métiers de services à la personne caractérisé par sa dimension relationnelle et non seulement technique ;
- l'informatisation croissante des outils pour la formation, voire l'autoformation¹¹ dont les simulateurs qui se développent notamment dans les contextes de forte automatisation ; ces dernières années, on note aussi une évolution vers une structuration en réseaux visant la réalisation de tâches individuelles ou collectives pour l'apprentissage, de façon éclatée géographiquement (téléformation) et temporellement.

2.3.3.3 Depuis la fin des années 1990

Trois axes principaux prolongent aujourd'hui cette thématique. Le premier est le développement d'une approche de la **conception des formations professionnelles à partir de - et au moyen de - l'analyse du travail**, conduisant à la fondation d'une « didactique professionnelle » (Bazile & Mayen, 2002 ; Pastré, 1997 ; Rogalski, 2004 ; Samurçay & Pastré, 1998). Cet axe s'est en particulier développé dans le contexte d'études portant sur des situations d'introduction de nouvelles technologies et d'automatismes dans les situations professionnelles (par ex. plasturgie Pastré, 1994), conduite de centrale nucléaire, etc., développant ainsi une réflexion et une expertise particulière dans le domaine de la conception des situations de formation utilisant la simulation et les simulateurs (par ex. Samurçay & Rogalski, 1998).

Le second axe (Rabardel, 1995 ; Rabardel & Beguin, 2005) s'intéresse à caractériser la **dynamique développementale du couplage psychologique utilisateur - outil** selon un mouvement parallèle d'élaboration et de restructuration des connaissances sur l'usage (schème) chez le sujet et de

¹¹ On en trouve une illustration dans deux communications au congrès de la SELF de 1987 qui portent en particulier sur « Autoformation, EIAO et ergonomie » (Salembier, Claes, Ounis, Razoarivelo, & Sridharan, 1989) et sur « un protocole d'évaluation ergonomique et pédagogique des didacticiels » (Dufoyer, 1989).

transformation physique et fonctionnelle de l'artefact utilisé (genèse instrumentale). L'intérêt récent pour les questions d'appropriation des nouvelles technologies s'inscrit en partie dans cette orientation.

Enfin, un troisième axe concerne **les technologies éducatives**, faisant suite ces dernières années, à la recherche dans les environnements interactifs d'apprentissage humain (EIAH) et à de fortes demandes en termes de méthodologie et de connaissances ergonomiques (par ex. Bétrancourt, 2007 ; Burkhardt, Lourdeaux et al., 2006 ; Burkhardt, Lourdeaux et al., 2003 ; Jamet, 2006 ; Tricot, 2007).

2.4 Conclusion

Nous avons proposé d'appréhender ce contexte des technologies émergentes, selon la perspective de l'ergonomie, comme ayant quatre caractéristiques principales (Anastassova, 2006) :

- un caractère novateur, une avancée technologique importante, partiellement réalisée ou en devenir ;
- des usages peu clairs ou différenciés ;
- plusieurs limites qui en ralentissent l'application massive ;
- une promesse de transformation du contexte économique et sociale, dans lequel elle est introduite.

Pour l'ergonomie, ces différentes caractéristiques engendrent des difficultés particulières mais aussi des opportunités.

D'un côté, pour ce qui est de **prendre en compte les besoins des utilisateurs et améliorer les conditions de leur activité**, l'application de méthodes classiques de l'ergonomie ne donne pas toujours les résultats attendus dans la mesure où il s'agit de technologies encore peu connues par leurs futurs utilisateurs. Un aspect intéressant des technologies émergentes est que la quête des besoins joue un rôle moteur pour le déclenchement d'une demande d'étude ergonomique paradoxalement souvent bien plus que l'évaluation. En effet, la question posée concerne souvent l'identification de besoins potentiels d'utilisateurs (éventuellement tout aussi potentiels) auxquels la technologie proposée pourrait répondre, plutôt que l'instruction d'un besoin établi a priori pour lequel on chercherait la meilleure solution technologique. Développer des outils et des méthodes intégrant les dimensions sociotechniques constitue un levier et un domaine de recherche important pour les contributions futures de l'ergonomie informatique dans ces projets. Nous n'aborderons pas beaucoup plus loin cet aspect pour deux raisons. La première est qu'il se place dans le cadre des recherches sur les conditions, l'outillage et la pratique en ergonomie, ce qui n'est ni le thème ni le point de vue central retenu dans cette synthèse. La seconde est qu'il existe une littérature et des recherches clairement documentées sur le sujet. Par exemple, on peut citer les travaux portant sur l'évaluation et l'efficacité des méthodes employées en ergonomie informatique, à différentes étapes du processus de conception, par ex. techniques d'évaluation d'interfaces (Bach, 2004 ; Bastien, Scapin, & Leulier, 1998), méthodes de production de spécifications pour la conception d'interfaces (Miller & Vicente, 2001), méthodes d'évaluation de la lisibilité et de la compréhension de diagrammes (Kutar, Britton, & Barker, 2002), etc. Il existe aussi des études sur l'activité de l'ergonome praticien, par exemple sur l'activité d'ergonomes experts en évaluation d'interface (Pollier, 1992), le rôle des outils ergonomiques dans l'intervention des praticiens (Querelle & Thibault, 2007), et les modalités d'action de l'ergonome dans des projets de changements organisationnels (Carbadella, 1997). J'y ai moi-même contribué au travers de l'encadrement d'une thèse co-dirigée avec J.-C. Sperandio (Anastassova, 2006) portant spécifiquement sur l'évaluation de différentes méthodes d'analyse ergonomique des besoins implicites et explicites dans le contexte d'une technologie émergente : la réalité augmentée. Ce point est présenté plus largement dans la partie 3.4.2.3 (p. 54 et suivantes).

D'un autre côté, le rôle de l'ergonomie est aussi de **contribuer à explorer les potentialités et à minorer les limites de ces technologies**. Il y a par conséquent une ouverture formidable pour la recherche ergonomique dans la mesure où se développent des situations perceptivement, cognitivement et socialement inédites. Dans le même temps, il semble opportun d'anticiper, voire de proposer des questions de recherches à la recherche technologique, qui soient fondées sur des questions liées à des contextes et des activités réels, plutôt qu'à des vues simplifiées et stéréotypées des besoins d'un utilisateur lui-même peu défini.

Un auteur (Green, 1997 ; Green, Petre, & Bellamy, 1991) a bien décrit deux postures typiques en ce qui concerne les bénéfices et les besoins potentiels associés à des technologies émergentes ou des artefacts qui en sont issus. Ces deux postures correspondent à l'hypothèse du naturel (« naturalness »), d'une part, et l'hypothèse d'absolue supériorité (« superlativism »), d'autre part. Les deux postures ne s'excluent d'ailleurs pas l'une et l'autre. L'hypothèse du **naturel** consiste à argumenter systématiquement sur le fait qu'une technologie est plus « naturelle » que celles précédemment mises au point, plus « proche de la façon dont

les gens raisonnent ou apprennent », plus « intuitive » etc. Les façons dont s'exprime cette hypothèse sont nombreuses. Le domaine des technologies émergentes en particulier dans le champ de l'interaction humain-système en pourvoit de nombreuses illustrations. Il y a quelques années, le plus grand « naturel » de la conception orientée-objets constituait ainsi l'un des arguments principaux de l'introduction de cette innovation dans le monde de la conception informatique. Aujourd'hui, on trouve dans nombre de travaux publiés des affirmations concernant le fait que l'immersion en environnements virtuels, la réalité augmentée ou, encore, les interfaces tangibles, offrent une interaction plus naturelle que les technologies dont on disposait auparavant. Or dans de nombreux cas, les études qui ont visé à évaluer cette hypothèse échouent à montrer un effet de supériorité réel et robuste : cela fut vrai pour la conception orientée-objets (voir par ex. Détienne, 1997), cela est vrai aujourd'hui pour de nombreux « nouveaux paradigmes » d'interaction (par ex. Bonnardel & Zenasni, 2010).

La posture de **supériorité absolue** consiste à considérer que la technologie proposée est - très simplement - meilleure que les autres quels que soient l'usage et l'objectif considérés. Je propose là une définition plus large que celle proposée par Green (1997) à propos des langages de programmation. Cette posture peut d'ailleurs reposer en partie sur l'argumentation du naturel - étant entendu que plus de naturel impliquerait une meilleure facilitation de l'utilisation et de l'apprentissage. Deux versions de cette posture coexistent dans la littérature. La plus courante, dans les premières phases d'apparition de la technologie considérée, consiste à affirmer la supériorité sans argument empirique, ni précision quant à l'activité et aux tâches pour lesquelles un bénéfice est attendu comparativement à l'existant. Avec le développement de la technologie et la multiplication d'études visant à évaluer empiriquement les performances de la technologie, la seconde version de la posture consiste à tenir peu compte de la tâche et de l'environnement dans les hypothèses qui sont soumises à évaluation. Or cela sous-entend d'une part implicitement une supériorité de la technologie évaluée par rapport à toutes les autres quels que soient la tâche et le contexte, voire les propriétés des sujets ciblés. En effet, ne pas faire d'hypothèse sur le lien entre la tâche, les processus cognitifs et les propriétés de l'artefact technique évalué comparativement aux précédentes en termes de supériorité revient à considérer la tâche expérimentale comme représentative de n'importe quelle tâche, les sujets participants comme représentatifs de n'importe quels utilisateurs réels. D'autre part, cela limite non seulement l'interprétation des résultats à des constats peu informatifs validant ou invalidant cette supériorité supposée absolue, mais cela restreint souvent aussi les investigations et les analyses. Les analyses se retrouvent par exemple circonscrites à l'observation de quelques différences (plus ou moins significatives au sens des tests d'inférence) sur un sous-ensemble restreint d'indicateurs de performance. Notamment, il y a peu d'analyses de l'activité menées dans ces situations, alors qu'elles sont nécessaires pour comprendre la façon dont interagissent les exigences de la tâche, les compétences des sujets et le cadre expérimental ou le terrain dans lequel se déroule l'étude.

Il est également une autre opposition apparente entre ce que l'on pourrait, à un extrême, définir comme les technologies « classiques » par rapport aux technologies « émergentes ». Les premières ne semblent pas devoir justifier leur plus-value lorsqu'un projet de conception est engagé : elles sont là, insérées dans le quotidien, et leur mise en œuvre semble aller de soi. Comme nous le notions avec J.-C. Sperandio dans une discussion sur le critère d'utilité - central en ergonomie¹² - dans les projets traditionnels de conception informatique (Burkhardt & Sperandio, 2004), il semble que les concepteurs ou les décideurs estiment souvent que l'utilité d'un produit informatique soit un fait acquis, dès lors que la décision de concevoir a été prise. L'utilité est parfois argumentée au travers d'objectifs en termes de bénéfices attendus, mais d'une façon qui peut laisser supposer une certaine neutralité de l'informatique et des nouvelles technologies. Ainsi lorsqu'elles sont formulées, les hypothèses sur les bénéfices de l'informatisation concernent des objectifs extérieurs à la technologie (amélioration du service, de la productivité etc.) sans que des analyses et des objectifs chiffrés et identifiés précisément du point de vue des utilisateurs et de l'impact sur leur activité ne soient retenus. Lorsqu'il s'agit des technologies émergentes, à l'inverse, de nombreuses hypothèses explicites sont faites en termes d'utilité (au sens de fonctionnalité ou de bénéfices attendus au travers des usages possibles) comme d'utilisabilité. Ces hypothèses sont souvent reliées à des dimensions liées à l'humain, telle la notion récurrente de « naturelle ». Lorsque j'ai travaillé sur la réutilisation en conception orientée-objets, ce paradigme - alors émergent et considéré comme innovant - était souvent justifié par son côté « plus proche du raisonnement naturel ». Il y a donc là un terrain important où l'ergonomie peut proposer une contribution importante en termes de recherche. Sur ces deux volets, l'analyse de l'activité a, de mon point de vue, un rôle central à jouer à plusieurs titres sur lesquels nous reviendrons plus loin. Par

¹² En ergonomie, le critère d'utilité correspond à un avantage significatif pour l'utilisateur dans une activité précise (en termes d'efficacité, de coût, de rapidité, de précision, d'agrément...) ; cet avantage est par essence toujours relatif : relatif à ses objectifs, relatif aux outils existants ou habituellement utilisés, relatif à l'environnement d'utilisation, et relatif aux dépendances avec les autres activités.

ailleurs, il apparaît aussi un vaste chantier à entreprendre pour construire les connaissances compte tenu des lacunes actuelles concernant de multiples facettes de l'activité impliquées dans les (futurs) usages des technologies émergentes.

Les trois grandes parties qui suivent se distinguent par l'examen successif de trois classes d'activités considérées en ergonomie : la conception, l'utilisation et la formation. L'accent est mis, dans chacune de ces parties, sur les façons dont l'apprentissage - au sens large - y est traité aujourd'hui - en général et (surtout) dans le contexte des technologies émergentes. Mes contributions à ces axes sont ensuite présentées de façon résumée - cela d'autant plus brièvement qu'elles se réfèrent à une étude publiée. En particulier pour ce qui est des articles fournis en accompagnement de ce document, un simple renvoi sera fait.

Conception et apprentissage

3 Conception et apprentissage

3.1 Introduction

Dans le langage courant, le terme de « conception » désigne de façon plus ou moins précise l'élaboration d'un nouvel objet (au sens large) ou d'une de ses représentations de telle sorte qu'il soit possible d'en réaliser la production. Ce nouvel objet peut être matériel (par ex. un pont, un système de transmission, une machine) ou immatériel (une œuvre musicale, un algorithme) ; le plus souvent, le résultat de l'activité sera la représentation de cet objet futur (plan d'architecte, logiciel).

L'ergonomie cognitive s'intéresse à la « conception » d'au moins deux façons différentes mais complémentaires : premièrement sous l'angle de sa participation et de sa contribution aux processus de conception, deuxièmement en prenant l'activité des concepteurs et l'organisation du processus comme objets d'étude.

La première posture est vraisemblablement la mieux connue. Elle consiste à agir pour faire prendre en compte, dans l'objet en cours d'élaboration, les contraintes liées aux caractéristiques de l'utilisateur final, aux caractéristiques de son activité et au(x) contexte(s) où cette activité prend place. Dans cette approche, il est souvent opéré une distinction entre l'ergonomie de conception et l'ergonomie de correction, laquelle distinction ne doit pas, selon moi, être considérée comme une exclusion de la correction du champ de la conception. La distinction entre ces deux pôles de l'intervention repose sur une différence de degré et non forcément de nature, i.e. degré de liberté dans les choix possibles et corrélativement le degré de finalisation supposé de l'objet considéré au moment de l'intervention dans le processus conception.

La seconde posture est adoptée dans la suite de cette partie. Elle correspond aux recherches qui prennent l'activité même des concepteurs comme objet d'étude. Deux principales épistémologies peuvent être distinguées dans ces études qui visent à comprendre l'activité de conception pour l'outiller (Roth, 2001). La première voit la conception comme la pure application de connaissances logiques, scientifiques et techniques. La seconde voit la conception comme un processus social, unique et hétérogène, où les connaissances rationnelles sont certes des ressources, mais d'importance moindre par rapport aux normes et aux pratiques à l'intérieur de la communauté. J'ai contribué à ce champ par certains de mes travaux, dans le cadre de ma thèse sur la compréhension et la réutilisation en conception orientée-objets, d'une part, puis par des études prenant pour terrain la conception de technologies émergentes et les communautés associées à la conception de logiciels libres. Ces recherches visent schématiquement à fournir des réponses à plusieurs questions (par ex. Détienne & Burkhardt, 2001 ; Bonnardel, 2009) telles que les suivantes :

- quelles sont les caractéristiques de l'activité (par ex. en termes de stratégies, de mécanismes cognitifs, de connaissances) et les facteurs qui peuvent l'influencer ?
- quels sont les besoins, les difficultés et les fonctionnalités qui permettraient d'assister les concepteurs dans leur activité ?
- quelle est l'utilisation effective des outils par les concepteurs, dans quels contextes, avec quelles limites et pour quelle efficacité ?
- quels sont les critères pour évaluer les caractéristiques ergonomiques d'un outil ou d'un environnement d'assistance à l'activité de conception considérée ?

3.2 Approches disciplinaires de la conception : quels liens avec l'apprentissage et le développement ? (synthèse)

De nombreuses disciplines s'intéressent à la conception : l'ergonomie et la psychologie, certes mais également la sociologie, les sciences économiques et de gestion, les technologies éducatives. J'examine ici les perspectives de différentes disciplines sur le lien entre apprentissage, développement et conception.

3.2.1 Sciences de gestion et sociologie : apprentissage organisationnel et développement individuel dans la conception

La sociologie et les sciences de gestion abordent la conception de multiples façons. J'insisterai ici sur les travaux visant la description et la compréhension des processus soit de conception, soit d'innovation. Commençons par rappeler qu'innovation et conception ne sont pas deux termes équivalents. La conception, au sens de la production d'une « invention », d'un « artefact nouveau », ne correspond en effet qu'à l'un des aspects de l'innovation, auquel viennent s'ajouter les processus conduisant au succès de sa diffusion. Le

critère pour parler d'innovation est donc le succès commercial d'un artefact, tandis que le critère pour parler de la conception est la formulation d'un problème et l'élaboration d'une solution qui le satisfasse sur un nombre raisonnable de critères. Si les termes de conception et d'innovation sont parfois utilisés l'un pour l'autre, c'est un raccourci que j'éviterai pour ma part, tant l'idée que faciliter « la conception » au sens de faciliter le travail des concepteurs ne me semble pas assimilable au fait de faciliter « l'innovation », sauf à adopter l'idée que le succès d'un produit soit lié à sa qualité propre qui conduirait à sa diffusion par effet de démonstration. Or un tel « modèle de diffusion » est clairement réfuté dans les travaux de sociologie de l'innovation et d'économie ayant étudié des processus réels d'innovation (voir par ex. Akrich, Callon, & Latour, 1988).

Deux approches principales me semblent pouvoir être distinguées. Dans une première approche (Midler, 1998), la notion d'apprentissage désigne le **processus de création et d'échange de connaissances** découlant de l'existence d'un **écart entre** d'un côté, **les connaissances disponibles et**, de l'autre côté, **les connaissances requises** pour la concrétisation progressive du projet de conception. Plus l'écart est grand, plus l'apprentissage est important. L'apprentissage est donc analysé comme un processus à la fois collectif et individuel, les connaissances étant distribuées entre les participants et évoluant dans le temps. Ce processus d'apprentissage explique les évolutions des façons de penser la conception et des modes d'organisation dans les entreprises (voir par ex. Midler, 1998), avec le développement de nouveaux métiers, de nouveaux besoins pour la conception et de nouveaux modes de coordination et de modifications des rapports de prescription entre acteurs de la conception. Il interroge dans le même temps la validité des modèles prescrits¹³, et permet d'interpréter les limites de précédentes tentatives d'outillages comme la capture et le stockage d'une expertise précise et bien délimitée. Pour les auteurs, l'enjeu est de « sortir de la représentation traditionnelle du savoir comme capital précédent l'action », en considérant que dans l'action « produire des connaissances et capitaliser sont une seule et même chose » (Hatchuel, Le Masson, & Weil, 2002). Hatchuel et ses collègues affirment ainsi que « dans un contexte d'innovation intensive, les organisations doivent inventer un régime d'apprentissages croisés essentiels à la production collective des connaissances » (p. 30).

Une autre approche sociologique met l'accent sur la nature distribuée et émergente des connaissances en conception, à partir de la notion de « communauté épistémique ». La centration se déplace alors de l'organisation comme entité « apprenante » vers l'individu et ses relations au sein de sa communauté d'appartenance, en termes de développement personnel. On y trouve notamment l'idée que participer à une communauté et apprendre sont liés, l'accroissement des connaissances évoluant parallèlement avec l'accroissement des interactions et les relations sociales (par ex. Conein, 2004 ; Ducheneaut, 2005). Ce modèle est par exemple exploité pour analyser le fonctionnement des concepteurs dans les collectifs distribués de conception de logiciels libres, basé sur le volontariat des participants et sur le caractère ouvert et public du code logiciel. Il constitue d'ailleurs une source d'inspiration pour les nouvelles formes de conception dans les entreprises. L'un des arguments est la capacité qu'aurait ce type d'organisation de la conception, à gérer de façon efficace les différentes questions posées par la conception en termes d'apprentissage et de compétences. Ce point est discuté à nouveau dans le § 3.4.2.4 où sont abordés certains des travaux menés par F. Barcellini sur ces nouvelles formes de conception, dans le cadre de sa thèse (Barcellini, 2008) co-encadrée avec F. Détienne.

3.2.2 Technologies éducatives et « design-based learning » : la conception, modèle pour l'apprentissage

Le domaine des technologies éducatives met aussi en avant une accointance importante entre conception et apprentissage. Plusieurs auteurs (par ex. Harel & Papert, 1990 ; Kolodner et al., 2003 ; Resnick & Ocko, 1990 ; Roth, 2001) considèrent l'activité de conception comme un paradigme pour l'apprentissage (design-based learning). Souvent inspirés par les travaux de S. Papert sur l'utilisation éducative de la programmation informatique, les arguments proposés par ces auteurs sont à de multiples niveaux. D'un point de vue théorique, la conception engendrerait un apprentissage par l'expérience dans la mesure où il s'agit d'une situation où il y a un problème à résoudre, qui plus est collectivement. Cette activité de résolution se concrétise de surcroît sous la forme de la production d'un artefact physique mettant en scène les notions et les concepts (scientifiques) à acquérir. Les artefacts physiques auraient ainsi un rôle complémentaire en ce qu'ils permettent aux apprenants de partager et de discuter plus aisément avec les autres partenaires durant

¹³ Midler (1998) note ainsi « L'économie actuelle est une économie de l'offre ("product and technology push"), où il est alors crucial d'investir dans la constitution d'expertises qui permettront d'anticiper et de susciter une demande qui, au départ, n'existe pas. Le modèle de l'ingénierie ne dit rien sur cette économie de la production des connaissances nécessaires à la conception. »

le travail sur l'objet en cours de conception. Simultanément, l'apprentissage concerne aussi l'expérience du processus de conception lui-même et de la mise en œuvre de ces notions et concepts. Par la nature même des problèmes de conception, les apprenants sont engagés dans plusieurs défis, avec des ressources elles-mêmes variées, ce qui aurait pour effet d'engendrer des compétences et des connaissances plus riches et plus proches du subtil façonnage né de la confrontation avec la réalité de la pratique. Un dernier argument concerne la dimension fortement engageante, socialement située et finalisée, de l'activité vécue au cours de la résolution d'un problème de conception. Ainsi, l'apprentissage qui en résulte s'avèrera plus profond, et serait acquis de façon plus efficace, par comparaison avec l'apprentissage résultant d'autres situations usant de pédagogies traditionnelles.

3.2.3 Ergonomie des activités de conception : l'acquisition par des novices de connaissances pour/sur la conception

En ergonomie et en psychologie, la conception a longtemps été considérée comme un travail d'expert, en particulier dans les approches les plus cognitives. L'apprentissage y a donc été peu considéré. Une exception concerne les travaux d'ergonomie cognitive sur l'apprentissage de l'informatique, de la conception architecturale et plus largement l'apprentissage de la conception. Ceux-ci étudient des concepteurs « novices », avec l'objectif d'améliorer ou d'outiller la formation de ces « futurs concepteurs » aux outils de la conception, par ex. apprentissage de l'algorithme, acquisition des langages de programmation.

Beaucoup de travaux se sont ainsi intéressés à l'apprentissage des langages de programmation (par ex. Anderson, Conrad, & Corbett, 1989 ; Hoc & Nguyen-Xuan, 1990). Ils ont porté majoritairement sur des enfants ou des étudiants, voire sur des experts dans le cas de paradigmes de comparaison experts-novices. Les thématiques actuelles portent essentiellement sur l'apprentissage de nouveaux paradigmes ou de concepts de la programmation. Les angles d'attaques sont divers, parmi lesquels on peut mentionner l'approche expérimentale, longtemps dominante, centrée sur l'étude des mécanismes mis en œuvre dans l'utilisation et l'apprentissage d'un langage de programmation informatique. D'autres approches par enquêtes et questionnaires s'intéressent à l'effet de différents facteurs sur la performance d'apprentissage, comme l'expérience préalable, la motivation, l'estime de soi et le sentiment d'efficacité (par ex. Bergin & Reilly, 2005). Beaucoup d'études ont porté sur la conception par objets dans les années 1990, s'intéressant en particulier à des langages tels que Smalltalk (par ex. Chatel, 1997), C++ ou java (par ex. Benander, Benander, & Sang, 2004 ; Garner, Haden, & Robins, 2005) et à des assistances à l'apprentissage comme l'enseignement de patterns (par ex. Byckling & Sajaniemi, 2005), la fourniture de modèles (par ex. Michel & Sperandio, 1996) et d'animations (par ex. Byckling & Sajaniemi, 2005 ; Khalife, 2006). Les difficultés d'apprentissage et les facteurs intrinsèques ou extrinsèques au succès dans l'apprentissage constituent également un thème récurrent (Garner et al., 2005 ; Kelleher & Pausch, 2005 ; Milne & Rowe, 2002 ; Pane & Myers, 1996 ; Robins, Rountree, & Rountree, 2003).

Plus récemment, la programmation par des utilisateurs non-informaticiens a été aussi étudiée (par ex. Beckwith et al., 2006 ; Davis & Wiedenbeck, 2001 ; Dorn, Tew, & Guzdial, 2007 ; Pane, Ratanamaha, & Myers, 2001), dans une approche que l'on peut qualifier de particularisation et de programmation par l'utilisateur (en angl. *end-user customizing/programming*). Les logiciels actuels supposent de plus en plus d'être au moins partiellement « reprogrammés », paramétrés et modifiés par l'utilisateur final, afin d'être exploités et efficaces. Cette évolution relativise d'ailleurs la distinction entre les activités "simples" de mises en œuvre pour utiliser un logiciel, comme l'écriture d'un script ou d'une requête, et les activités de « résolution de problèmes mal définis » traditionnellement étudiées dans le champ des études sur la programmation informatique.

3.2.4 Dimension réflexive de la conception et développement individuel des connaissances professionnelles

Dans la lignée des travaux de Schön (1983), l'activité du concepteur est décrite fondamentalement comme un processus développemental des savoirs professionnels, fait d'un « dialogue continu » avec la situation sur laquelle il intervient. Le concepteur forme un projet, anticipe une situation, et la situation concrète lui « répond », le « surprend », présente des résistances inattendues. Le terme de situation fait ici référence à l'ensemble des éléments pertinents (matériel, social, culturel) à un instant donné. Les artefacts de médiation et le collectif ont un rôle central en ce qu'ils fournissent au concepteur autant d'occasions réitérées d'un tel dialogue. L'apprentissage est ainsi décrit comme un apprentissage expérientiel où les idées, les hypothèses et les projections mentales du concepteur sont confrontées à leur matérialisation dans une situation unique, laquelle les valide, les réfute ou les remets en mouvement du fait de la résistance de la situation. Cette résistance est à l'origine de l'apprentissage, car conduisant le concepteur à développer une activité réflexive

non seulement sur son action et les raisons de la divergence entre les attentes et la situation unique rencontrée, mais également sur les hypothèses ou les théories qui les sous-tendent. C'est ce dialogue, sans cesse réitéré, entre les hypothèses que le concepteur formule, et le retour offert par leur réalisation qui est ainsi à l'origine de la construction de nouveaux savoirs ancrés dans l'expérience.

3.3 Evolution des travaux en ergonomie des activités de conception (synthèse)

Cette partie remet en perspective les grandes évolutions des travaux en ergonomie des activités de conception.

3.3.1 Origines et cadre d'analyse initial

Dans les années 1970, les premières études sur la conception informatique sont menées principalement par des informaticiens. Les recherches ont alors comme objectif principal l'évaluation d'outils informatiques en termes de performance (Schneiderman, 1980). Ce domaine a suscité depuis les années 1980 un intérêt de la part des psychologues (Hoc, 1984) qui y ont vu un terrain pour étudier des activités de conception. Un domaine de recherche appelé "Psychologie de la Programmation" ou plus récemment "Ergonomie Cognitive de la Conception" s'est ainsi développé et différents ouvrages témoignent de l'évolution de l'état de l'art dans ce champ d'étude (Détienne, 2002 ; Gilmore, Winder, & Détienne, 1994 ; Hoc, Green, Samurçay, & Gilmore, 1990 ; Visser, 2006 ; Bonnardel, 2006).

Ces études ont abordé la conception comme une activité individuelle de résolution de problèmes mettant en relation des domaines de connaissances distincts : le domaine du problème, le domaine des solutions (cf. Brooks, 1977 ; Burkhardt, 1997 ; Guindon, 1990b ; Kant & Newell, 1984 ; Kim, Lerch, & Simon, 1995). Les **problèmes de conception** ont été caractérisés dans ce cadre comme étant :

- **mal définis**, i.e. les spécifications du problème sont incomplètes et/ou imprécises (Goel, 1992 ; Simon, 1973). Une part de l'activité de résolution va de ce fait consister à introduire des spécifications supplémentaires ;
- **ouverts**, i.e. plusieurs alternatives de solutions coexistent et diffèrent sur de multiples dimensions et critères (Bisseret, Figeac-Letang, & Falzon, 1988 ; Bonnardel, 1999). Ces deux premières caractéristiques sont importantes par la dimension "constructiviste" qu'elles confèrent à l'activité de conception, pour laquelle le problème traité est alors véritablement construit par le concepteur (Visser, 1992) ;
- **constraints mais pouvant faire appel à une certaine créativité**, i.e. les solutions sont caractérisables par un certain degré de « nouveauté » et par le fait qu'elles satisfassent un ensemble (éolutif) des contraintes explicites (e.g. énoncé du problème) ou ajoutées par les concepteurs (e.g. suite à l'établissement d'une analogie avec une situation proche). Ces contraintes délimitent les possibles parmi les options envisageables, mais offrent aussi un guide pour les examiner, voire en engendrer de plus novatrices (Bonnardel, 2006) ;
- **larges et complexes** ; ainsi du fait de la capacité limitée de la mémoire de travail, cette caractéristique entraîne l'impossibilité, pour le concepteur, à se représenter et à manipuler simultanément toutes les parties interagissant du système qu'il élabore (Curtis, 1989) ;
- **longs** (Guindon, 1990a) au-delà de la temporalité habituelle du laboratoire, puisque la durée séparant la spécification initiale du problème et la livraison de la solution se compte en semaines, en mois, voire en années plutôt qu'en minutes ou en heures au maximum pour les situations de laboratoire ;

3.3.2 Des travaux focalisés sur les connaissances du concepteur expert, ses stratégies et l'organisation de son activité

Jusqu'à la fin des années 1990, les études se sont centrées sur les raisonnements conduisant à l'élaboration de solutions en mettant l'accent sur le rôle de connaissances génériques stockées en mémoire. Ainsi, de nombreux travaux ont eu pour but de formaliser les connaissances des experts en conception de programmes informatiques (par ex. Bergantz & Hassel, 1991 ; Black, Kay, & Soloway, 1986 ; Chatel & Détienne, 1996 ; Darses, 1992 ; Détienne, 1986 ; Détienne, 1997, 2002 ; Gilmore, 1990 ; Navarro-prietto & Canas, 1998 ; Petre, Blackwell, & Green, 1998 ; Rist, 1989, 1996). E. Soloway (Soloway, 1982 ; Soloway & Erlich, 1984) propose par exemple une catégorisation hiérarchisée des structures de connaissances génériques possédées par les informaticiens. On peut noter que bien qu'il semble improbable que de telles connaissances génériques constituent le seul type de connaissances utilisé par les concepteurs -même

experts-, peu de recherches ont concerné la mise en jeu d'autres types de connaissances durant la conception.

Les études empiriques ont également analysé les stratégies suivies par les concepteurs pour résoudre les problèmes qui leur sont soumis. La notion de stratégie (ou d'heuristique) renvoie ici à un concept psychologique visant à représenter un certain niveau de contrôle du sujet sur sa propre activité, c'est-à-dire à une forme de coordination planifiée des moyens pour atteindre le but que s'est fixé le concepteur, les moyens étant les connaissances, les opérations cognitives et les actions. Différentes stratégies ont été décrites (Figure 4), caractérisées par les directions suivies pour la décomposition de la solution (par ex. Kant & Newell, 1984 ; Rist, 1991), le type de guidage adopté pour cette décomposition (par ex. Chatel & Détienne, 1996 ; Davies, 1994 ; Rist, 1996), le recours à différents types de simulation mentale (Burkhardt & Détienne, 1995a ; Kant & Newell, 1984 ; Lebahar, 1996 ; Visser, 1992), la réutilisation de tout ou parties de programmes existants (Burkhardt, 1997 ; Burkhardt & Détienne, 1994, 1995a, 1995b ; Détienne, 1991 ; Visser & Trousse, 1993).

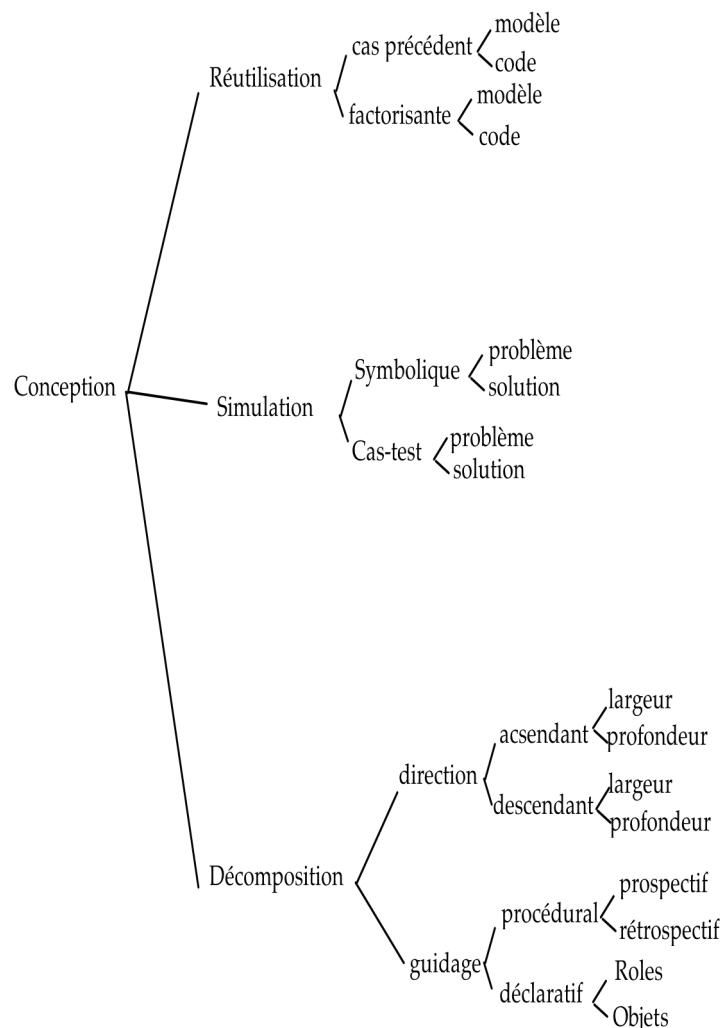


Figure 4. Trois principales stratégies observées au cours de l'activité individuelle de conception et leurs dimensions décrites dans la littérature, d'après Burkhardt (1997)

Enfin, de nombreux travaux se sont également intéressés à l'organisation individuelle de l'activité du concepteur, considérée, en rapport avec les stratégies et les processus mis en œuvre, comme les mécanismes liés au contrôle de l'activité (par ex. Visser, 1992). Ces travaux mettent en évidence notamment le caractère opportuniste de l'organisation de l'activité. Selon certains auteurs, cette caractéristique est consécutive à la gestion économique des informations et des ressources disponibles (Visser, 1994). Le concepteur contrôle l'organisation de son activité, et pour cela est amené à évaluer fréquemment le coût des actions qu'il lui est possible d'entreprendre. Par exemple, la disponibilité immédiate d'une information concernant une partie de la solution autre que celle en cours de développement, peut amener le concepteur à mettre cette dernière en attente pour anticiper sur le développement de l'autre partie. Visser (1994) note

que la limitation des ressources cognitives explique parfois aussi certaines des déviations observées. Pour d'autres auteurs au contraire, l'activité est fondamentalement organisée de façon hiérarchique (Davies & Castell, 1992), et les déviations opportunistes sont vues comme accidentnelles, relevant principalement de défaillances dues aux limitations du système cognitif.

Outre la résolution de problèmes, d'autres types d'activités des concepteurs ont été analysés plus en détail, tels la compréhension de programmes (par ex. Koenemann & Robertson, 1991 ; Burkhardt, Détienne & Wiedenbeck, 2002 ; voir également chapitre 4, § 4.5.1), l'évaluation (par ex. Bonnardel, 1999), la gestion des contraintes (par ex. Darses, 1992 ; Chevalier, 2007), le raisonnement à base de cas et l'analogie (par ex. Visser, 1996). Des synthèses récentes des travaux et des cadres théoriques concernant en particulier la dimension cognitive de la conception ont été publiées (voir Détienne, 2002 ; Visser, 2006).

3.3.3 Bilan de ces premiers travaux quant aux liens avec l'apprentissage et élargissement récent des questionnements

Il y a eu par conséquent peu d'approches traitant des questions d'apprentissage dans ces premiers travaux, en dehors des études évoquées dans le panorama disciplinaire précédent à propos de l'apprentissage de la conception (cf. 3.2.4), notamment en génie logiciel. Beaucoup d'études ont néanmoins impliqué des novices ou des débutants, mais selon une logique de comparaison avec les experts, pour faire apparaître les traits spécifiques de l'expertise. Dans ce contexte, il ne s'agissait pas d'analyser les besoins ou les processus associés à l'acquisition de connaissances.

Les approches et les questions concernant les études des activités et des processus de conception ont évolué ces dernières années. Une des raisons de cette évolution est que l'ergonome intervient de plus en plus pour analyser le déroulement et la mise en œuvre de méthodes ou d'outils de la conception, dans des situations réelles ou simulées. Les éventuels mécanismes mis en œuvre par le concepteur pour résoudre individuellement une sous-partie du problème deviennent ainsi moins prépondérants relativement à d'autres aspects de l'activité tels que la coordination entre les participants, la prise de décision en situation de conflits, l'articulation entre différents domaines de compétence, les mécanismes de construction et de mise à jour d'une « représentation commune » de l'artefact en cours d'élaboration, l'argumentation, l'identification et le traçage des logiques de conception. Une autre raison est l'évolution elle-même des technologies d'assistance à la conception ainsi que l'apparition de nouvelles formes d'organisation dans la conception, comme la conception distribuée, la conception de logiciels libres par des communautés auto-organisées de participants bénévoles (pour une mise en perspective, voir par ex. Darses, 2009 ; Détienne, 2006).

Cette évolution concerne notamment trois directions récentes d'élargissement des études en ergonomie des activités de conception : de l'activité individuelle à l'activité collective, de l'activité co-localisée (ou en face-à-face et en coprésence pour reprendre deux autres termes fort usités) à l'activité à distance et, enfin, d'une approche plutôt unidimensionnelle à une approche multidimensionnelle. Ces trois directions sont évoquées à la suite.

3.3.4 De l'individuel au collectif

Contrastant avec l'ancrage initial dans l'activité individuelle du concepteur expert, la conception a ensuite été vue comme une activité collaborative impliquant différents acteurs (voir par ex. Darses, 2009, 2001 ; Détienne, 2006 ; Falzon & Darses, 1996 ; Mantovani, 1996 ; Rabardel, Rogalsky, & Beguin, 1996). Ainsi à côté de l'activité individuelle, d'autres phases d'activités en lien avec le collectif sont analysées :

- la co-conception (Falzon & Darses, 1996), correspondant à des situations où les participants travaillent en face-à-face ou à distance afin de progresser conjointement dans la résolution d'un problème ;
- la conception en parallèle¹⁴ (Falzon & Darses, 1996) lorsque la coopération porte essentiellement sur la coordination temporelle des ressources et des tâches.

Ces travaux ont enrichi le modèle initial de l'activité rendant compte des mécanismes typiquement étudiés dans le cadre de la résolution individuelle de problèmes de conception (évaluation, proposition, etc) que l'on pourrait caractériser comme relevant de la tâche (« task-related ») en y ajoutant plusieurs catégories d'activités qui relèvent (Barcellini, Détienne, Burkhardt et al., 2008 ; Détienne, Burkhardt, Hebert, & Perron, 2008) :

¹⁴ L'auteur utilise le terme de « conception distribuée », je préfère ici celui de parallèle pour éviter toute confusion avec la traduction française des termes « distributed design » se référant à la situation générique de conception distribuée dans l'espace, le temps et parmi plusieurs participants.

- de la **communication** et de l'établissement d'un référentiel commun (également appelé *clarification* ou *synchronisation cognitive*) ;
- de la **coordination** et de la **gestion du groupe et du projet** (« group and project management »), comme la planification, l'assignation des tâches, la rédaction de comptes-rendus ou d'ordres du jour ;
- de l'**équilibre dans la répartition des rôles** entre les participants, à l'échelle du groupe comme de chaque participant, ainsi que de la **motivation**, (symetry, orientation and motivation). Ces derniers aspects sont encore peu traités dans les études sur la conception collaborative (cf. néanmoins Baker, Détienne, Lund, & Séjourné, 2003 ; Barcellini, Détienne, Burkhardt et al., 2008), alors qu'ils semblent avoir un impact important sur la façon dont se déroule la collaboration et sur la performance en termes de conception (Burkhardt, Détienne, Hebert, Perron et al., 2009).

Ces travaux ont aussi identifié et étudié certains des aspects spécifiques de la situation collaborative de conception qui sont susceptibles d'influencer l'activité des concepteurs :

- existence de **multiples interdépendances** entre concepteurs ou groupes de participants relativement à la prise en charge et à la décomposition des tâches (Détienne, 2006), impliquant la nécessité d'une activité de coordination; cette coordination (ou synchronisation opératoire) concerne alors divers aspects comme l'assignement et le suivi de la réalisation des tâches, des ressources ;
- **diversité des compétences et des points de vue** entre les participants, associée à la distribution de l'information au sein du collectif impliquant la mise en oeuvre de mécanismes communicationnels et de négociation (ou synchronisation cognitive/clarification.) ; d'autres études évaluent les facteurs impactant la capacité des concepteurs à intégrer le point de vue d'autres participants, comme par exemple les contraintes ergonomiques ou les exigences des utilisateurs (par ex. Chevalier, 2007) ;
- **coexistence de rôles liés à plusieurs plans de l'activité collective**, tels que (Barcellini, Détienne, Burkhardt et al., 2008) le plan de *la discussion*, correspondant à la conduite des interactions discursives, le plan de *la conception*, correspondant à la fois à des activités de conception proprement dites (évaluation, proposition, simulation etc.) et à leur organisation.

L'apport des sociologues du travail sur la façon d'aborder la question de la coordination et la coopération dans les groupes et les organisations est également à souligner (par ex. de Terssac, 1996; Hatchuel, 1996; Jeantet, 1996 ; Maggi, 1987 ; Maggi & Lagrange, 2002). De même, on peut noter l'influence des travaux de sociologues et des modèles tels que celui de la cognition distribuée (par ex. Conein, 2004) pour décrire les régulations et le fonctionnement à l'intérieur de communautés de conception.

3.3.5 Du face-à-face au travail à distance

Les études sur la conception collaborative ont d'abord concerné des situations de co-conception en face-à-face (par ex. D'Astous, Détienne, Robillard, & Visser, 1997, 2001 ; Herbsleb et al., 1995 ; Olson, Olson, Carter, & Storrosten, 1992). Plus récemment, des études se sont intéressées aux situations de collaboration distantes exploitant des dispositifs variés de médiatisations (par ex. Burkhardt, Détienne, Moutsinga-Mpaga et al., 2008 ; Détienne, Boujut, & Hohmann, 2004) en cherchant à élargir le cadre théorique et l'approche pour mieux rendre compte des activités associées à la conception collaborative médiée (par ex. Burkhardt, Détienne, Hebert, Perron et al., 2009 ; Sack et al., 2006 ; Gronier, 2006). Ces travaux cherchent notamment à étudier l'influence, sur l'activité, de propriétés de la situation et des environnements informatisés proposés : effet de la distance, effet des fonctions disponibles, effet des caractéristiques de l'interface (par ex. Barcellini, Détienne et al., 2005a ; Barcellini, Détienne, Burkhardt, & Sack, 2005b ; Burkhardt, Détienne, Hebert, Perron et al., 2009 ; Burkhardt, Détienne, Moutsinga-Mpaga et al., 2008 ; Burkhardt, Détienne, Moutsinga-Mpaga et al., 2008 ; Olson & Olson, 2000; Sumner, Bonnardel, & Kallag-Harstad, 1997).

Ces travaux mettent en évidence des évolutions tant en regard des activités observées que de l'organisation spatiale et temporelle de la conception dans les projets, dont :

- *un recours intensif à des représentations et artefacts externes* qui tout à la fois scandent et *réfléchissent* vis-à-vis des acteurs certains aspects de l'évolution des différents points de vue, de l'état du problème et des solutions envisagées ; ainsi, tant une fonction temporaire de mémoire qu'une fonction dialogique pour la simulation et le partage d'une représentation commune de la situation sont couramment associées à ces produits périphériques de la conception ;
- une *spécialisation dans l'espace de participation* ; par exemple, trois espaces (au sens d'outils et d'activités fortement couplées) coexistent dans les communautés virtuelles de la conception distribuée de logiciels libres (Figure 5) : un espace de discussion, un espace de documentation où est stockée une partie des documents produits au cours de la conception et un espace d'implantation ;
- des activités liées à la *participation*, à l'*intégration dans le groupe*, ou encore au développement individuel par et au travers de ces nouvelles communautés instrumentées.

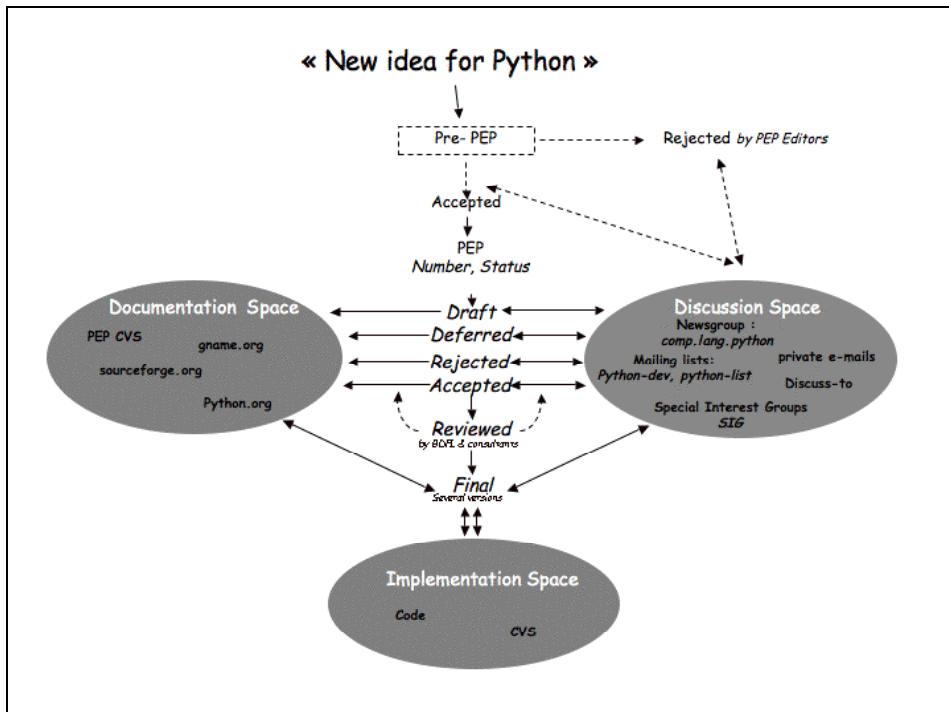


Figure 5. Trois espaces d'activités associés au processus de conception en ligne dans le cadre du projet Open Source Python (Barcellini, Détienne, Burkhardt et al., 2008)

L'articulation entre des espaces distincts et la dynamique de l'activité à l'intérieur de ces espaces, la nature des rôles sociocognitifs et les profils des participants qui les endosserent constituent d'ailleurs des questions de recherche actuelle. Nous avons commencé à les traiter dans le cadre de la conception des logiciels libres (par ex. Barcellini, Détienne, & Burkhardt, 2005, 2007b, 2008, 2009a ; Barcellini, Détienne, Burkhardt, & Sack, 2006 ; Barcellini, Détienne, Burkhardt et al., 2008).

3.3.6 D'une approche unidimensionnelle vers une approche multidimensionnelle

A de très rares exceptions, les études sur les situations de conception collaborative adoptent une approche relativement monodimensionnelle dans le recueil et l'analyse d'indicateurs de l'activité. Par exemple, de nombreux travaux se sont intéressés à l'argumentation produite pour analyser les interactions et la logique de décision dans les collectifs de conception. En effet, les verbalisations produites dans différentes situations, ou encore les traces accessibles engendrées par l'usage des nouvelles technologies (messages échangés via les outils de communications, versions des documents, etc.) fournissent un matériau riche pour la compréhension de la dynamique de la conception (Barcellini, Détienne et al., 2005a). Les modèles linguistiques de l'argumentation offrent en outre un cadre adapté pour comprendre les patrons de discussions en œuvre entre les participants et à l'intérieur des collectifs de conception (Détienne, Burkhardt, & Visser, 2003). L'évolution de l'intérêt des études vers la conception collaborative et vers l'impact des outils du travail à distance sur l'activité a conduit à souligner la coexistence de multiples dimensions dans l'activité des différents participants, ainsi que les interactions existant entre ces dimensions.

Dans la perspective d'appréhender plus largement ces dimensions impliquées – et dans l'optique de la mise en place d'une méthodologie d'évaluation des situations et des outils d'assistance à la conception collaborative, nous avons proposé de formaliser et d'aborder en parallèle plusieurs dimensions de la conception collaborative. Sur la base d'extraits vidéo de l'activité des concepteurs, la méthode s'appuie sur des indicateurs qualitatifs afin d'évaluer la qualité de la collaboration selon sept dimensions (Tableau 1) : (1) La fluidité de la collaboration, (2) La compréhension mutuelle soutenue, (3) L'échange d'informations pour la résolution de problèmes, (4) L'argumentation et la prise de décision, (5) Les processus de travail et la gestion du temps, (6) L'équilibre des contributions, (7) L'orientation individuelle envers la tâche (pour le détail de la méthode et les études de validation, voir Burkhardt, Détienne, Hebert, & Perron, 2009 ; Burkhardt, Détienne, Hebert, Perron et al., 2009 ; Hebert et al., 2009 ; Safin, Verschueren, Burkhardt & Détienne, 2010). La fluidité de la collaboration est par exemple évaluée sur la base de l'observation de

l'absence ou non de chevauchements entre les tours de paroles des participants, du suivi et de la fluidité des échanges verbaux et/ou de la communication non-verbale, sur la base également de la cohérence des objets sur lesquels les participants focalisent leur attention, sur l'absence ou non d'interférences entre participants dans l'utilisation des outils, etc. Ces sept dimensions résultent initialement d'un croisement entre les données empiriques concernant la conception collaborative (Détienne et al., 2008) et des dimensions de l'évaluation précédemment développées dans le champ de l'apprentissage collaboratif médiatisé par ordinateur (voir Spada, Meier, & Rummel, 2005). Ce travail a été mené pour une bonne part dans le cadre d'un projet avec FT R&D sur l'outillage des questions ergonomiques dans la conception de dispositifs de collaboration exploitant les technologies de Réalité Augmentée ; il a donné lieu à une collaboration croisée avec le LUCID group, laboratoire à l'origine d'un bureau d'architectes exploitant la réalité augmentée pour assister la phase d'esquisse en architecture. Deux étudiantes de master ont participé à ce projet en codirection avec F. Détienne : L. Moutsinga et A.-M. Hebert.

Dimensions	Définition	Indicateurs
1. Fluidité de la collaboration	Gestion de la communication (tours de parole), des actions (utilisation d'outils) et de l'orientation de l'attention	- Fluidité des tours de parole - Fluidité de l'utilisation des outils (stylets, menu) - Cohérence de l'orientation de l'attention
2. Compréhension mutuelle soutenue	Construction et maintien de référentiels communs à propos de l'artefact conçu (problème, solutions), actions des concepteurs, état du dispositif (par ex. fonctions activées)	- Compréhension mutuelle de l'état du problème/solutions - Compréhension mutuelle des actions en cours et envisagées - Compréhension mutuelle de l'état du système (fonctions, documents ouverts)
3. Génération d'idée pour la résolution de problème	Mise en commun d'idées, raffinement et cohérence des idées avancées	- Génération d'idées de conception (problème, solutions, cas précédents, contraintes) - Raffinement des idées de conception - Cohérence et continuité entre les idées évoquées
4. Argumentation et atteinte de consensus	Présence ou non d'argumentation et de processus de prise de décision basée sur les consensus	- Critique et argumentation - Vérification de l'adéquation des solutions avec les contraintes de conception - Prise de décision collective
5. Processus de structuration de la résolution du problème et gestion du temps	Planification (par ex. allocation des tâches) et gestion du temps	- Planification du travail - Division des tâches - Distribution et gestion des interdépendances entre tâches - Gestion du temps
6. Orientation coopérative dans le groupe	Equilibre des contributions de chacun des acteurs dans la conception, la planification et la réalisation d'actions verbales et graphiques	- Symétrie des contributions verbales - Symétrie des contributions graphiques - Symétrie dans la gestion de la tâche - Symétrie dans les choix et les décisions de conception
7. Orientation individuelle envers les tâches	Pour chaque concepteur : motivation, implication (action) et engagement dans la tâche courante	- Montrer sa motivation et encourager les autres en termes de motivation - Constance des efforts mis dans la tâche - Orientation de l'attention en regard de la tâche de conception

Tableau 1.Quelques dimensions centrées-groupes et centrées-individu de l'activité de conception collaborative en situation de co-conception, et indicateurs utilisés dans une méthode d'évaluation rapide de la qualité de la collaboration (d'après Burkhardt, Détienne, Hebert, Perron et al., 2009).

3.4 L'apprentissage et le développement dans la conception (contributions empiriques)

3.4.1 De l'apprentissage lié à l'innovation à l'apprentissage dans et au cours de la conception

Le lien entre apprentissage et conception est abordé sous des formes et en référence à des processus variés. Cette pluralité naît de la multitude d'acteurs (individu, groupe voire métier ou discipline) s'entremêlant dans différents espaces, dans différentes temporalités et suivant des objectifs eux-mêmes variés.

Un premier lien évident entre la conception et l'apprentissage concerne le processus d'apprentissage qu'impose à l'utilisateur la prise en main de toute nouveauté issue de la conception. La conception aboutit en effet, entre autres résultats, à un nouvel outil, une nouvelle tâche, une nouvelle situation. Il en découle de la part de chaque primo-utilisateur ou de chaque opérateur concerné la nécessité d'un apprentissage, lequel peut se concevoir au travers de l'utilisation et éventuellement de la formation. Le cadre de référence peut se situer du côté de l'utilisateur (on parlera alors **d'apprentissage, d'apprenabilité** etc.). Certains auteurs adoptent un cadre de référence situé à l'interface entre l'utilisateur et l'artefact, visant alors à décrire le processus d'appropriation de l'artefact par l'utilisateur (par ex. genèse instrumentale Rabardel, 1995 ; Rabardel & Beguin, 2005), en soulignant la **co-évolution continue des connaissances de l'utilisateur et des propriétés de l'artefact**, bien après sa « conception ». Cette approche insiste sur l'existence d'une dynamique de co-construction à la fois des connaissances -pour le sujet-, et de l'artefact lui-même. Ces aspects probablement les plus évidents de l'apprentissage consécutif à la conception étant directement en lien avec l'utilisation, ils sont traités dans la partie « Apprentissage et utilisation » (voir § 4.4, p. 84). Ce processus d'apprentissage des utilisateurs peut s'accompagner d'une continuation de la conception dans le sens où les utilisateurs/opérateurs vont ajouter des modifications concrètes à l'artefact voire au système sociotechnique. La conception ainsi continuée se traduit également par la création de nouveaux usages par les utilisateurs, au fur et à mesure que se construisent les connaissances liées à l'utilisation (Rabardel & Beguin, 2005), mais aussi en fonction des opportunités et des évolutions de l'environnement. Ce raisonnement, s'il est considéré comme valable à l'échelle d'un nouvel outil dans la situation de travail ou dans les activités de la vie quotidienne, pour un opérateur individuel, vaut aussi à l'échelle des groupes, des communautés ou des organisations.

Ce premier lien n'est pas le seul. Deux autres façons de considérer le lien entre conception et apprentissage sont présentées à la suite :

- **l'apprentissage mutuel croisé entre les acteurs d'un processus de conception** (Beguin, 2003 ; Hatchuel, 1996). Se positionnant à l'échelle du projet, cette façon de voir appréhende le processus de conception comme un processus d'échange, de localisation et d'ajustement de connaissances distribuées au sein d'un collectif ; la clôture du collectif, la nature des unités qui le composent, l'empan temporel et le cadre de référence adopté varient néanmoins suivant l'auteur et ses objectifs ;
- **l'apprentissage et la mémoire organisationnels comme processus de production de connaissances à l'échelle des organisations** ; le cadre de référence dépasse ici largement le projet, ses acteurs et sa durée.

3.4.2 Apprentissages mutuels croisés entre les acteurs pour produire des artefacts utiles et adaptés

3.4.2.1 Nécessité, bidirectionnalité et échelle des apprentissages mutuels croisés entre acteurs

La mobilisation de connaissances très diverses est requise tout au long de la co-conception : connaissances sur l'usage et les utilisateurs, connaissances sur la conception et les éventuels domaines techniques ou méthodologiques, etc. Toutes ces connaissances ne sont pas partagées initialement par l'ensemble des acteurs du processus de conception. Elles ont même tendance à être plutôt réparties entre des concepteurs relevant de différentes disciplines et des utilisateurs futurs ou potentiels de la technologie pour l'application en cours de développement. La conception de tout artefact implique par conséquent un processus d'apprentissage mutuel entre tous les acteurs (Beguin, 2003 ; Hatchuel, 1996) pour produire un artefact utile et adapté. Ce processus d'apprentissage est médié par des productions intermédiaires (par ex. documents

de spécification, schémas, maquettes, prototypes échelle 1) dont la genèse et la mise en discussion ponctuent l'histoire du projet. Ce processus d'apprentissage par échanges mutuels croisés est encadré par des rapports de pouvoir. Il est aussi contraint à l'intérieur d'une enveloppe de ressources et il est borné par des échéances temporelles.

Dans un contexte ergonomique de compréhension de l'activité de conception et de développement d'une conception réellement « participative », deux cibles sont identifiées de façon privilégiée pour cet apprentissage mutuel : les concepteurs et les utilisateurs. Chaque cible est typiquement associée au contenu de connaissances réputé lui être propre (par ex. Beguin, 2003). D'un côté, les utilisateurs (ou les opérateurs dans le cas de la conception d'un système de travail) sont associés à l'expérience et aux connaissances directement reliées à l'usage : le domaine de problème, le métier concerné, l'activité des utilisateurs et ses contextes notamment. De l'autre côté, les concepteurs sont associés à l'expérience et aux connaissances sur la conception, sur le domaine technique, sur les solutions et les contraintes du moment, entre autres. Les échanges sont bidirectionnels, allant des futurs utilisateurs vers les concepteurs, et des concepteurs vers les utilisateurs.

D'autres auteurs s'intéressent à l'activité des concepteurs en situation de co-conception. Ils décrivent un processus similaire à une échelle plus restreinte au travers de la notion de synchronisation cognitive (Falzon, 1994) ou encore de clarification. Il s'agit toujours d'échanger des connaissances entre les participants, mais avec l'objectif de se comprendre et pas forcément de contribuer à l'élaboration de l'artefact en cours de développement. Le processus recouvre alors les activités de communication dont l'objectif est d'établir entre les participants un contexte de connaissances mutuelles, en construisant un référentiel commun et en s'assurant que les participants ont connaissance des faits relatifs à l'état du projet (avancement, solution retenue ou rejetée, etc.). A une échelle plus large, un moteur important pour la mise en place d'apprentissages croisés entre co-concepteurs réside dans l'existence de « points de vue » différents – voire divergents – dans les projets de conception (Détienne, Martin, & Lavigne, 2005 ; pour une discussion sur les acceptations de la notion de point de vue en conception et une proposition de méthode d'analyse cognitivo-discursive, voir par ex. Wolff, Burkhardt et de la Garza, 2005).

3.4.2.2 Une analyse des méthodes de l'ergonomie en termes des apprentissages croisés mutuels

Deux questions m'ont intéressé.

La première question concerne **les propriétés des méthodes usuelles de l'ergonomie relativement à la mise en place et à l'efficacité des apprentissages croisés mutuels**. En d'autres termes, il s'agit de voir en quoi les méthodes de l'ergonomie sont susceptibles ou non – et à quelle(s) condition(s) – d'outiller un tel processus d'échanges croisés entre concepteurs et utilisateurs, au sein d'un projet de conception avec les technologies émergentes. Cette question est traitée dans le cadre relativement traditionnel d'un projet industriel pour la maintenance automobile, contexte dans lequel a été réalisée la thèse de M. Anastassova. Le groupe projet, où des utilisateurs potentiels étaient impliqués, avait pour objectif de concevoir, au moyen des technologies de la réalité augmentée, un artefact pour l'assistance des techniciens de la maintenance automobile (cf. Anastassova, 2006 ; Anastassova, Burkhardt, Mégard, & Ehanno, 2005).

La deuxième question concerne **l'application de ce cadre à des situations où les conditions et l'organisation de la conception changent** – au moins a priori – radicalement, comme dans le cas des mouvements communautaires de conception constitués autour du logiciel libre. En effet, les études ayant fourni une base aux analyses de l'activité de conception dans les termes des apprentissages croisés mutuels ont été menées, sauf erreur de ma part, dans le contexte de projets industriels traditionnels mêlant co-présence et conception distribuée au sein d'un collectif bien délimité. Cette question est alimentée par les données issues d'un projet réel dans lequel nous avons identifié puis analysé finement les rôles et les contributions de participants en ce qui concerne l'émergence d'un besoin porté par des utilisateurs. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre de la thèse de F. Barcellini (Barcellini et al., 2007b ; Barcellini, Détienne, & Burkhardt, 2007c, 2008, 2009b ; Barcellini et al., 2009a ; Barcellini, Détienne et al., 2008). La contribution évoquée porte sur la participation des utilisateurs dans ce type d'organisation proche de la conception participative, et sur les facteurs affectant l'émergence d'un besoin « poussé » par les utilisateurs.

Je présente les deux contributions dans les sections ci-après.

3.4.2.3 Contribution des méthodes ergonomiques selon la perspective des apprentissages croisés mutuels : exemple dans une approche « traditionnelle » de la conception

La contribution présentée part d'une analyse comparative de l'apport de différentes méthodologies ergonomiques à l'étape de l'analyse des besoins pour la conception des technologies émergentes, sur la base de la comparaison des données et résultats issus de plusieurs études menées dans le contexte de la réalité augmentée (Anastassova, 2006 ; Anastassova & Burkhardt, 2007 ; Anastassova, Burkhardt, & Mégard, 2007 ; Anastassova et al., 2006 ; Anastassova, Burkhardt, Mégard, & Ehanno, 2005 ; Anastassova, Burkhardt, Mégard, & Leservot, 2005 ; Anastassova, Mégard et al., 2007).

3.4.2.3.1 L'analyse des besoins comme phase privilégiée des apprentissages croisés mutuels

Une **analyse défaillante des besoins** constitue la première cause d'échec des projets dans le domaine informatique et les nouvelles technologies (Hofmann & Lehner, 2001). Par échec, je désigne ici le fait que la conception débouche sur un produit qui fonctionne (du point de vue des concepteurs), mais qui s'avère inadéquat pour l'activité et l'environnement humain social et technique pour lequel il est conçu (du point de vue des utilisateurs). Trois causes typiques sont (Lauesen & Vinter, 2001) :

1. des attentes inexprimées par les utilisateurs ne sont pas prises en compte dans le processus de conception,
2. la mauvaise compréhension des besoins,
3. la méconnaissance de l'existant et des possibilités technologiques.

Le fait qu'il s'agisse de conception avec des technologies émergentes engendre potentiellement des difficultés supplémentaires. Faute de précédents, les contextes des usages futurs restent souvent peu précis et définis. L'approche de la conception, en laboratoire, est très largement centrée sur la technologie, ce qui signifie que c'est l'atteinte des objectifs de mise au point de la technologie et la réalisation de démonstrateur ou prototype illustratifs de l'innovation proposée qui prennent généralement sur d'autres critères ; les besoins des utilisateurs constituent alors dans ce contexte une préoccupation mineure et périphérique. D'autres difficultés sont rappelées dans la littérature :

- des principes « restrictifs » (Grundin, 1991) comme la simplicité de la solution finale, la rapidité de développement, la réutilisation (Følstad & Rahlff, 2005 ; Kjeldskov & Graham, 2003) peuvent orienter et diriger les efforts vers la conception d'un artefact qui fonctionne à tout prix, le plus rapidement possible, avec pour conséquence qu'il soit souvent développé en marge de son contexte d'utilisation (Foster & Franz, 1999 ; Stary, 2002). Ainsi, les possibilités d'analyser les besoins et d'anticiper les futurs usages sont largement limitées, voire l'utilité de ce type d'analyses est remise en question ;
- le poids moindre du besoin relativement à la disponibilité de telle ou telle fonction dans une technologie ; souvent en effet, une exigence ou un « besoin » est adopté « parce qu'on sait le faire », avec l'hypothèse que cela doit bien répondre à un besoin (Sperandio, 2001). Certes, un besoin « latent » peut apparaître et s'intensifier après un temps et un développement suffisant ;
- le fort attachement des concepteurs à leur statut d'experts (Bodker & Gronbaek, 1991 ; Bruseberg & MacDonagh-Philp, 2001) les amène souvent à éviter de remettre en cause cette image en allant chercher des solutions de conception auprès des utilisateurs ;
- la méconnaissance des méthodes disponibles pour l'élaboration des besoins et des spécifications (Maiden & Rugg, 1996). Cela se traduit aujourd'hui par le recours à des méthodes souvent naïves lors du recueil des besoins (par ex. le questionnaire), lesquelles échouent ou encore produisent peu d'information qui ne soit déjà connue des concepteurs. En outre, elles ciblent souvent imparfaitement les interlocuteurs les plus pertinents, en termes d'apprentissage concernant l'activité ciblée à un niveau de détail opérationnel.

Ce diagnostic conduit à souligner le rôle de la mise en place d'échanges entre les différents acteurs du projet, en particulier entre les utilisateurs et les concepteurs, pour éviter de tels échecs. L'analyse des besoins constitue l'un des moments forts de co-conception d'un projet (Darses, 2009), où ces échanges et ces apprentissages mutuels croisés vont potentiellement être réalisés. Les enjeux liés à l'identification et à l'analyse précise des besoins sont clairement posés dans la littérature (Anastassova, 2006 ; Anastassova & Burkhardt, 2007 ; Barki & Hartwick, 1991 ; Damodaran, 1996 ; Nielsen, 1993) :

- qualité accrue des systèmes conçus, du fait de spécifications plus précises ;
- définition plus aisée et plus précise des objectifs du projet ;
- moins d'itérations dans le cycle de conception, comparativement aux projets où aucune analyse des besoins de l'utilisateur n'a été réalisée ;
- base rationnelle pour éviter des caractéristiques coûteuses inutiles ou non souhaitées du système ;
- acceptation et compréhension améliorées du système, conduisant à une utilisation plus efficace ;
- dialogue amélioré entre les différentes parties prenantes.

3.4.2.3.2 Analyser les besoins : une activité mal définie et peu étudiée en ergonomie

La nature de l'activité d'analyse des besoins est floue et ambiguë. Les différents termes dans la littérature traduisent d'ailleurs ce problème de positionnement. Ainsi, le terme « élicitation » est souvent préféré (par ex. Coughan & Macredie, 2002) à celui de « capture » ou encore de « collecte », dans la mesure où ces deux derniers termes pourraient laisser penser que les besoins préexistent à celui qui les recueille, suggérant qu'il suffirait donc de poser la question appropriée pour les obtenir. Outre l'élicitation, d'autres phases de l'activité interviennent de façon itérative telles les phases d'analyse et de négociation sur les spécifications, la documentation et la validation des spécifications élaborées.

La notion de besoins (« user needs & requirements ») est elle-même mal définie et n'est pas partagée de façon identique par l'ensemble des interlocuteurs de la conception (incluant les utilisateurs eux-mêmes). Trois types de « besoins » coexistent en fait (Anastassova, 2006 ; Anastassova & Burkhardt, 2007) :

- les **besoins explicitement formulés** par les (futurs) utilisateurs, c'est-à-dire « conscients » (Robertson, 2001). Toutefois, ces besoins sont généralement incomplets, voire en décalage avec les besoins réels, et ce d'autant plus qu'ils sont assimilés sans précaution à la demande, laquelle provient rarement de l'utilisateur réel. Or on sait, en ergonomie, l'importance de l'étape de reformulation et de clarification de cette demande, avant de s'engager dans tout projet ;
- les **besoins non conscients**, qui résultent de plusieurs facteurs possibles. L'absence d'opportunité offerte aux utilisateurs concernés pour réfléchir sur leur activité actuelle est un premier facteur. Un second réside dans la méconnaissance qu'ont les utilisateurs des propriétés et des potentialités offertes par la technologie choisie, empêchant ainsi la mise en correspondance de ces potentialités avec les propriétés critiques de la tâche et de l'activité ciblée. Un autre facteur majeur réside dans la nature non verbalisable de certains besoins, liés par exemple à des automatismes dans l'activité ;
- les **besoins « latents »** (Sperandio, 2001) se caractérisant par leur nature potentielle, non encore avérée ou encore « inimaginée » (« undreamed-of » requirements, Robertson, 2001). Ce troisième type de besoin correspond à un enjeu important pour les technologies émergentes, en particulier dans une logique d'innovation intensive (Hatchuel et al., 2002) : les technologies étant encore au stade du développement en laboratoire, et donc en devenir, elles sont à la recherche de leurs applications.

Malgré les enjeux forts qu'elle porte, l'analyse des besoins reste une activité peu étudiée en ergonomie de la conception. Certes, certains des travaux évoqués dans la partie précédente ont permis d'étudier des phases initiales de la co-conception (par ex. Burkhardt, Détienne, Moutsinga-Mpaga et al., 2008 ; Burkhardt, Détienne, Moutsinga-Mpaga et al., 2008). Toutefois dans ces travaux, l'accent est généralement mis sur la nature de l'activité des co-concepteurs, et beaucoup plus rarement sur le rôle et la contribution des utilisateurs/opérateurs à cette activité. De plus, cette activité et le contenu des échanges sont alors rarement mis en correspondance avec l'utilité et les propriétés de l'artefact qui en découle, en termes d'adaptation à l'usage et aux utilisateurs/opérateurs. Enfin, les propriétés et les contributions respectives de l'outillage ergonomique pour l'analyse des besoins sont elles-mêmes des questions peu abordées dans la littérature en ergonomie, cela en particulier pour le contexte de projets d'innovation avec les technologies émergentes (voir cependant Nicolas, 2000). Cette question, à travers l'analyse de l'utilisation de différentes méthodes dans le cadre d'une technologie émergente (i.e. la réalité augmentée appliquée à la formation des techniciens de maintenance véhiculaire dans l'industrie automobile) a été le sujet central de la thèse de M. Anastassova (Anastassova, 2006).

3.4.2.3.3 Faible poids des contributions de l'ergonomie à l'analyse des besoins et hypothèses de généralité des méthodes dans le domaine des technologies émergentes

Bien qu'il soit classique, en ergonomie, d'affirmer l'importance de l'analyse des besoins et de l'intervention en amont de la conception, force est de constater que la dimension d'évaluation d'un système existant avec des utilisateurs semble nettement prédominer, voire représenter la contribution ergonomique à la conception des technologies émergentes de façon quasi-exclusive. Ainsi seul 18% d'une sélection de 145 articles concernant les technologies d'assistance à domicile pour les personnes âgées ou handicapées (Magnusson et al., 2004) traitait de l'analyse des besoins des utilisateurs. Nous avons nous-même montré cette faible contribution de l'ergonomie à l'analyse des besoins dans la conception de dispositifs exploitant les technologies de la réalité augmentée (Anastassova, 2006 ; pour le détail de l'analyse, voir Anastassova, Burkhardt & Mégard, 2007).

Méthodologie de l'étude : analyse de 48 articles de conférences et de revues (publiés entre 1998 et 2006) dans le domaine de la Réalité Augmentée¹⁵ sélectionnés à partir de plusieurs séries de conférences et de revues soit

¹⁵ Cette synthèse est fondée sur une acceptation étendue de la Réalité Augmentée en tant que technologie. Ainsi, est considéré comme appartenant au domaine de la Réalité Augmentée, tout système qui exploite une technologie

du domaine, soit susceptibles de publier des contributions sur le domaine (par ex. International Journal of Human-Computer Interaction, Presence: Teleoperators & Virtual Environments, International Journal of Human-Computer Interaction, IEEE Virtual Reality, IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR). La sélection a été faite sur la base d'un double critère (a) de mise en œuvre d'une approche centrée sur les utilisateurs, i.e. impliquant des utilisateurs à au moins l'une des étapes de la conception ou ayant recours à des méthodes de type inspection ; (b) de présentation de résultats empiriques concernant des analyses des besoins ou des évaluations de systèmes (Anastassova, Burkhardt, & Mégard, 2007).

Notre étude confirmait notamment la forte prédominance de l'évaluation d'interface et de systèmes comparativement à l'analyse des besoins, cette dernière ne représentant que 17% des articles sélectionnés. Par ailleurs, les méthodes et les résultats de l'approche ergonomique dans la phase d'analyse des besoins sont présentés dans la littérature comme s'appliquant à tout type de projet informatique. Toutefois, les exemples et les illustrations concernent souvent des applications plutôt traditionnelles. Il en découle que, même si la généralité des méthodes proposées est habituellement considérée comme acquise, la démarche scientifique impose de se poser la question de leur adéquation - et de la nécessité éventuelle de leur adaptation - dans le domaine des technologies émergentes et des nouveaux espaces numériques. La question a d'ailleurs été posée dans le cadre d'un atelier qui s'est déroulé en septembre 2007 dans le cadre de la conférence INTERACT 2007 : « Are New Methods Needed in User-Centered System Design? » dans lequel M. Anastassova a présenté certains résultats de sa thèse (Anastassova & Burkhardt, 2007).

3.4.2.3.4 Le cadre des apprentissages croisés mutuels peut éclairer les contributions des méthodes de l'ergonomie : approches monodirectionnelles vs. co-constructions

Le cadre des apprentissages mutuels croisés souligne en quoi l'analyse des besoins s'apparente à un dialogue conduisant à des échanges d'expérience entre les concepteurs, d'un côté, et les personnes dont l'activité est concernée par l'artefact en cours de conception, de l'autre côté. La notion d'apprentissages croisés mutuels permet d'éclairer la question en forçant à dépasser la vision de l'analyse des besoins comme un processus à sens unique de recherche d'information pour les concepteurs (où l'ergonome peut se situer en tant que médiateur ou fournisseur) à propos des usages et des (futurs) utilisateurs. Le rôle des méthodes de l'ergonomie dans ce processus d'échanges et les facteurs qui les favorisent, ou au contraire les inhibent, constituent alors un programme de recherches.

Les études menées en Ergonomie à l'étape de l'analyse des besoins peuvent être associées plutôt à l'une ou à l'autre des directions d'échange de l'expérience entre les concepteurs et les utilisateurs. Parmi les rares études existantes, deux groupes se différencient ainsi selon les méthodologies privilégiées et la façon de concevoir la notion de « besoins » (Anastassova, Burkhardt, & Mégard, 2007).

Le premier groupe concerne les approches monodirectionnelles de l'analyse des besoins, considérant principalement le transfert d'expérience allant de l'utilisateur vers le concepteur. Bon nombre d'études adoptent en effet la posture de l'opérateur (ou futur utilisateur) assimilé à une source d'information dont il s'agit de « capturer » les propriétés essentielles, mettant alors l'accent sur la seule direction d'échange de l'utilisateur vers le concepteur. Ces études privilégiennent le recours aux entretiens avec un petit nombre d'experts (par ex. Gabbard et al., 2002 ; Green, Gyi, Kalawsky, & Atkins, 2006), les questionnaires (par ex. Patel et al., 2006) et les analyses rapides de l'activité des futurs utilisateurs sur le terrain (par ex. Park, Blythe, Monk, & Grayson, 2006 ; Träskbäck & Haller, 2004). Elles considèrent essentiellement les besoins analysés comme une donnée préexistante verbalisable et connue des sujets. Or ce postulat initial apparaît non vérifié dans bon nombre de contextes technologiques « non émergents », une grande partie de l'expertise et de l'activité étant peu propice au rapport verbal, voire étant inaccessible à la conscience, cela d'autant plus que le degré d'implication des automatismes, construits sur la base de l'expérience, est fort dans l'activité. De surcroît dans le cas des technologies émergentes, celles-ci sont rarement connues par les futurs utilisateurs du fait de leur nature novatrice. Faute de cette connaissance a priori, la majorité des futurs utilisateurs a donc des difficultés extrêmes à imaginer ce qu'il est possible d'en faire et d'en attendre, étant alors peu à même d'exprimer un besoin que ces utilisateurs ne se représentent pas.

Le second groupe d'études, moins représenté aujourd'hui dans la littérature, considère les besoins comme une donnée partiellement implicite, mal définie ou latente nécessitant un travail d'élaboration collective important avant de parvenir à une circonscription précise et un contenu explicite détaillé. Dans cette approche, on trouve plutôt des méthodes telles l'évaluation de prototypes et de scénarios avec des utilisateurs (par ex. Aliakseyeu, Martens, & Rauterberg, 2006 ; Anastassova et al., 2006 ; Anastassova, Mégard et al., 2007 ; Leonard & Rayport, 1997), les analyses ethnographiques de longue durée (par ex. Mackay, 2000), les synthèses de la littérature ciblant les contextes et les types d'utilisation impliqués (par ex.

combinant, en temps réel, des éléments réels et virtuels sémantiquement reliés (par ex. AR systems, « tangible interfaces »).

Anastassova, Burkhardt, Mégard et al., 2007 ; Lourdeaux, Mellet-D'Huart, & Burkhardt, 2003), voire l'analyse de l'existant (par ex. Burkhardt, Lourdeaux, & Lequatre, 2005). L'analyse détaillée de l'activité reste quant à elle peu fréquente (voir cependant Anastassova, Burkhardt, Mégard, & Ehanno, 2005).

Ce premier constat suggère que les méthodes mises en oeuvre pourraient avoir une affinité accentuée vers l'un ou l'autre des sens de l'échange entre expérience de la conception et expérience de l'activité et de l'usage.

3.4.2.3.5 Un premier regard sur la contribution des méthodes de l'ergonomie à l'analyse des besoins : facilitation vs. inhibition des apprentissages croisés mutuels

Les méthodes et les techniques utilisées pour l'analyse des besoins dans le domaine des technologies émergentes ont un statut différent vis-à-vis des échanges associés aux apprentissages croisés mutuels. Nous avons distingué quatre principales catégories :

- les méthodes s'appuyant sur **les connaissances de la littérature**, pertinentes pour la future situation d'usage. Cette catégorie n'implique pas a priori de dominance en termes de direction spécifique de l'échange d'expérience, cette dernière étant externalisée dans les supports et la documentation publiés. L'accessibilité, voire l'intérêt donné aux connaissances peut toutefois différer selon les acteurs et le projet considéré ;
- **les évaluations formelles et informelles de maquettes et de prototypes**. Ces méthodes ont l'intérêt, pour l'utilisateur, de mettre en scène des exemplaires réels de la technologie ciblée. L'évaluation et la discussion autour de prototypes –même si le prototype n'est pas exactement celui du projet en cours – peuvent ainsi se révéler un puissant moyen pour permettre aux opérateurs et futurs utilisateurs d'accéder à une part de l'expérience des concepteurs quant à la technologie ciblée, et de comprendre ce qu'envisage et ce que rend possible la conception. En retour, elles peuvent permettre aux concepteurs de construire une représentation plus précise de ce que font et ce que « veulent » les opérateurs. Encore faut-il qu'une discussion s'établisse et que les attentes des autres acteurs de la conception vis-à-vis de l'évaluation soient en phase avec l'objectif d'une co-construction des besoins, c'est-à-dire d'une co-conception à la fois de l'artefact conçu et des usages qui l'accompagnent ;
- les méthodes fondées sur **les scénarios et techniques dérivées**. Cette catégorie partage avec la catégorie précédente l'idée d'un support externe exploitable pour à la fois réifier et faciliter les échanges entre les concepteurs et les utilisateurs. Dans ce sens, il n'y a pas encore une fois de direction favorisée a priori dans les échanges.
- les méthodes d'**analyse de l'activité actuelle** et l'**extrapolation des besoins à partir d'une activité existante** (Brangier, 2006 ; Burkhardt & Sperandio, 2004). Hors de la participation des utilisateurs, il peut y avoir une tentation vers une réduction de la place des utilisateurs à celle de simples informateurs dans le processus de conception. Le risque est d'autant plus grand que l'ergonome peut se voir, à tort, conféré le statut de représentant des utilisateurs, voire de « super-utilisateur » au sein de l'équipe de conception (Burkhardt & Sperandio, 2004).

Une analyse des limites, des apports et des contributions des grandes classes de méthodes de l'activité à partir de la littérature et des exigences portées par chacune a été réalisée (voir notamment Anastassova, 2006, chapitre 3). Par la suite, nous avons étudié comparativement les apports de trois méthodes : l'entretien semi-dirigé, l'analyse détaillée de l'activité à partir d'enregistrements vidéo de situations réelles de travail, et l'évaluation de prototypes. Les grandes lignes des résultats sont données ailleurs (Anastassova, 2006 ; voir aussi Anastassova et al., 2006 ; Anastassova, Burkhardt, Mégard, & Leservot, 2005 ; Bach et al., 2008). En résumé, les comparaisons effectuées ont clairement montré leur complémentarité en termes de capacité à produire de l'apprentissage :

- les **entretiens** (incident critique ou guide d'entretien centré sur l'activité) permettent de cibler rapidement les problèmes de la situation de travail étudiée, alors qu'inversement l'observation directe de difficultés est rare dans l'observation de l'activité quotidienne des opérateurs. Les entretiens sont particulièrement adaptés pour les situations de travail qui impliquent de nombreux acteurs agissant avec des objectifs variés. Ils permettent aussi d'évaluer rapidement l'applicabilité de la technologie envisagée, au travers de l'utilité probable du système envisagé, de certains aspects de son acceptabilité, et de la description du contexte sociotechnique général. Cette contribution est d'autant plus importante en amont, qu'elle rend possible, le cas échéant, la réorientation du projet, comme ce fut le cas à la suite de la première étude de M. Anastassova (Anastassova, Burkhardt, Mégard, & Ehanno, 2005) ;
- les **observations** sont coûteuses en temps, en ressources pour la conception du codage comme pour sa réalisation et les analyses statistiques qui s'ensuivent, et par l'obtention d'un accès au terrain pas toujours simple à obtenir tant perdure le mythe selon lequel l'innovation rend caduque l'examen de

l'activité dans la situation courante. En revanche, elles permettent de construire une image plus systématique de la situation de travail étudiée, d'identifier quelques limites des ressources physiques et de l'environnement, et fournissent une base alimentant la construction de scénarios concrets d'utilisation du futur système. Cette base est d'ailleurs exploitable pour la création de tâches pour les évaluations avec les futurs utilisateurs ;

- **l'évaluation de prototypes** est complexe et contraignante (voir par ex. Anastassova et al., 2006 ; Anastassova, Mégard et al., 2007). Elle est contraignante techniquement, mais aussi du point de vue de la disponibilité et des délais qui bornent l'exploitation d'un prototype dans un projet. Elle permet cependant d'évaluer l'utilité et la compatibilité de l'application vis-à-vis de la tâche, sur la base d'une mise en œuvre complète par l'utilisateur potentiel. En revanche, le caractère encore en développement du prototype allié aux propriétés de la technologie utilisée (par ex. mobile, poids et encombrement dans le cas de la Réalité Augmentée, casque dans le cas de la Réalité Virtuelle, etc.) sont autant de sources de biais pouvant affecter des indicateurs simples comme le temps ou les erreurs. C'est pourquoi il apparaît souvent plus intéressant d'opérer des analyses détaillées et qualitatives des stratégies d'utilisation et des difficultés rencontrées par les utilisateurs, plutôt que de restreindre l'analyse aux comparaisons purement quantitatives en termes de rapidité et de précision.

3.4.2.3.6 Conclusion

Pour ce qui est de la question des apprentissages croisés, je soulignerai pour finir quelques perspectives qui restent pour certaines à investiguer plus finement.

Premièrement, ce n'est pas seulement la méthode mais aussi les modalités précises de sa mise en œuvre qui influencent sa capacité à renseigner la conception. Par exemple dans une analyse critique comparative de deux évaluations de prototypes menées dans deux projets d'utilisation des technologies de réalité mixte, nous avons mis en exergue le rôle de plusieurs facteurs sur la pertinence des résultats produits par l'évaluation d'un prototype et sa contribution à la construction d'une représentation commune d'un système potentiel d'assistance (Anastassova, Mégard et al., 2007). Ces facteurs sont notamment le degré de fidélité du prototype, le caractère représentatif ou non des utilisateurs, le caractère écologique de la tâche vis-à-vis des participants au test. Or non seulement ces facteurs interagissent et influencent les bénéfices issus de la méthode, suivant l'étape du processus de conception, mais ils interviennent également en tant que soutien ou non au processus d'échanges. Par exemple, le fait de faire intervenir ou non des sujets représentatifs affecte clairement l'opportunité ou non de développer des échanges entre utilisateurs et concepteurs.

Deuxièmement, l'ordre et les dépendances que les différentes méthodes entretiennent devraient être étudiées plus finement pour proposer un guidage à la co-construction des besoins dans le cadre de projets réels dans le contexte des technologies émergentes. Sur le plan strict de la contribution à la définition des propriétés de l'artefact, les entretiens permettent de déterminer les fonctions principales d'assistance du futur système, et donnent quelques idées générales sur le travail. En revanche, contrairement à l'observation de l'activité dans les situations réelles de travail ou d'usage, les entretiens sont insuffisants pour construire des scénarios concrets d'utilisation de la future technologie, et a fortiori pour en spécifier les modalités d'interaction. L'observation contribue, quant à elle, à spécifier des fonctions secondaires du futur dispositif, à la définition de certains aspects liés à l'utilisabilité de la technologie émergente, ainsi qu'à un modèle détaillé de formes potentielles d'utilisation envisageables sur la base de l'existant.

Enfin au moins autant que le choix ou la combinaison de telle ou telle méthode, c'est la mise en commun des résultats de ces méthodes, dans des réunions conjointes, qui peut permettre une meilleure compréhension réciproque. On notera que les résultats issus de la mise en œuvre d'une méthode ne requièrent pas toujours les mêmes efforts et ne sont pas toujours simples à présenter et à faire partager lors de discussions. Par exemple, des résultats d'analyse faites à partir d'observations sont généralement riches, longs et difficiles à organiser et à présenter sous une forme facilement utilisable au sein du collectif. Là encore une assistance et un outillage seraient probablement souhaitables. Dans ce contexte, j'ai souligné, il y a déjà quelques années, que le recours à des outils issus de la réalité virtuelle pourrait être une voie à emprunter (Burkhardt, 2003b), non seulement sous l'angle de la simulation mais également sous l'angle du partage de représentations. Les outils que nous sommes en train de développer dans le contexte de la plateforme ANR PERFRV2 entrent clairement dans ce cadre, même si aujourd'hui, les avancées les plus importantes ont été faites dans le contexte d'applications de formation. Pour cette dernière raison, ils sont présentés dans la partie Formation et Apprentissage du mémoire (voir chapitre 5).

3.4.2.4 Nouvelles questions sur les apprentissages croisés mutuels dans les communautés de conception distribuée

3.4.2.4.1 Logiciel libre et communautés de conception associées

Le Logiciel Libre (ou Open Source) est un artefact logiciel qui peut être modifié, exécuté et redistribué par ses utilisateurs, ceci grâce à des licences d'utilisation spécifiques qui « ouvrent le code » – d'où le terme Open Source - c'est-à-dire qui donnent la possibilité aux utilisateurs des logiciels d'avoir accès à leur code source. Les projets Open Source constituent des collectifs communautaires organisés sur la base de la participation volontaire de leurs membres : il n'y a souvent ni contrat de travail unissant le participant au projet, ni rétribution directe liée à cette participation (Demazière, Horn, & Zune, 2007). Les projets les plus connus (Linux, APACHE ou encore le langage de programmation Python et sa galaxie de projets associés, voir Figure 6) forment des communautés fortement hiérarchiques et méritocratiques (Gacek & Arief, 2004 ; Mahendran, 2002). La conception y est hautement médiatisée et asynchrone : les concepteurs de logiciels libres travaillent dans des lieux séparés géographiquement, se rencontrent rarement et coordonnent leur activité en utilisant essentiellement des outils de l'Internet (Mockus, Fielding, & Herbsleb, 2002) tels la messagerie électronique, les forums de discussions, les listes de diffusion, les wikis et les plateformes de travail coopératifs. Ces outils peuvent être intégrés dans des plateformes de développement (Sourceforge.net par exemple).

3.4.2.4.2 Deux approches complémentaires pour étudier les échanges entre concepteurs et utilisateurs dans la conception de logiciels libres

L'étude précise de la dynamique des échanges de connaissances entre concepteurs et utilisateurs au sein d'un collectif de conception a été l'un des aspects du travail de recherche mené par F. Barcellini (Barcellini, 2008) sur les communautés du logiciel libre, dans le cadre de sa thèse codirigée par F. Détienne et moi-même. Le logiciel et la communauté considérés sont le langage Python (Figure 6). Les résultats issus d'entretiens avec des participants, de l'analyse de la documentation et de nos analyses de la participation nous ont conduit à séparer les communautés orientées-usage (périphérie) de la communauté orientée-conception (centre), sur la base des activités privilégiées relativement à Python (utilisation vs. conception).

Je me focaliserai sur deux approches parallèles de la question de la participation des utilisateurs au sein de la dynamique de co-conception avec les concepteurs : une approche transversale de la participation et une étude longitudinale centrée sur l'émergence d'un besoin.

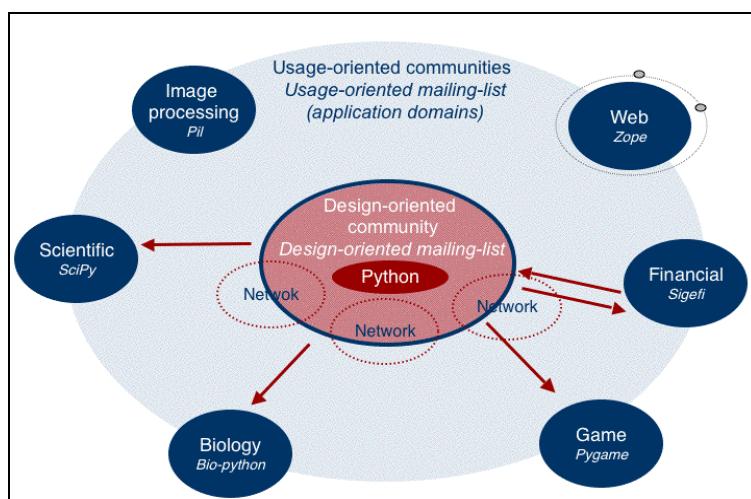


Figure 6. La « galaxie » du langage Python.

L'approche transversale a consisté à analyser les échanges et les modes effectifs de participation des utilisateurs et des concepteurs dans différents espaces de discussion d'un projet (par ex. Barcellini, Détienne, & Burkhardt, 2005 ; Barcellini, Détienne, & Burkhardt, 2006b ; Barcellini et al., 2007b, 2007c ; Barcellini et al., 2009a ; Barcellini, Détienne, & Burkhardt, 2009c ; Barcellini, Détienne et al., 2005a ; Barcellini, Détienne, Burkhardt et al., 2006 ; Barcellini, Détienne, Burkhardt et al., 2008 ; Barcellini, Détienne et al., 2008). La forte implication des utilisateurs est en effet présentée comme la force du mode de développement des logiciels libres (Raymond, 1999) par rapport au modèle et aux situations traditionnels de la conception. Or si la participation des utilisateurs à l'identification des dysfonctionnements (Bugs) commence à être bien décrite dans la littérature (par ex. Riposte & Sansonnet, 2006), la participation de ces

mêmes utilisateurs au processus de conception à proprement parler - c'est-à-dire à la génération et à l'évaluation de solution de conception - n'a pas encore été investiguée, alors même que la prise en compte des utilisateurs - ou la conception participative- est de plus en plus mise en avant en conception (Darses & Reuzeau, 2004). Cet enjeu est d'autant plus crucial que des études soulignent que les logiciels libres souffrent de problèmes d'utilisabilité (Twidale & Nichols, 2005).

La seconde approche a consisté à analyser l'histoire et les discussions successives concernant une idée de besoins exprimée puis poussée par des utilisateurs sur une période de plusieurs années, au sein du même projet (Barcellini, Détienne, & Burkhardt, 2007a ; Barcellini, Détienne et al., 2008).

3.4.2.4.3 *Interactions entre acteurs et participation effective des utilisateurs à la conception : l'étude d'un processus encadré de conception*

Une façon d'aborder la question des échanges entre concepteurs et utilisateurs consiste à analyser le(s) rôle(s) effectivement tenu(s) par les participants à la conception, tels qu'ils émergent des interactions, par opposition aux rôles prescrits souvent statutaires et hiérarchiques (par ex. chef de projet, expert etc.). Pour cela, différentes analyses complémentaires ont été conduites sur des discussions sélectionnées dans le corpus issu des listes de discussion utilisées par la communauté Python. Ces analyses ont porté tant sur le niveau du descriptif structural (nombre de messages, nombre de contributeurs, nombre et liens de citations, etc.) que sur le niveau du contenu (analyse du contenu des messages et des citations en vue de caractériser l'activité qui y est présente, par ex. proposition de solution, évaluation, clarification).

Les résultats de ce travail (voir Barcellini, Détienne, & Burkhardt, 2006a ; Barcellini, Détienne et al., 2006b ; Barcellini et al., 2007a, 2007b, 2007c) suggèrent que, plus qu'une forme de conception participative ouverte à tous les utilisateurs, la conception de logiciels libres et l'usage sont articulés "en ligne" par des participants clés jouant le rôle de médiateurs entre les utilisateurs et les développeurs du logiciel. L'analyse montre aussi un certain nombre de particularités, au moins valables pour le cas de Python et des participants aux projets gravitant autour du langage.

Il y a une répartition des participants entre trois espaces d'activité (discussion, implémentation et documentation), les participants différant en partie suivant l'espace considéré. A l'intérieur de l'espace de discussion, il y a une spécialisation de deux listes de discussion « conception » et « usages » en cohérence avec leur destination, tant en termes d'activité que de participants « dominant » les discussions. On trouve ainsi de façon privilégiée les activités d'évaluation et de clarification au sein de la liste orientée-usage, tandis que la liste orientée-conception est le lieu privilégié d'activités du type proposition, coordination, ainsi que les activités axées sur les relations interpersonnelles.

Nous avons aussi montré que les activités d'évaluation, de proposition et de clarification (synchronisation cognitive) sont les plus représentées, quelle que soit la liste (conception vs. usage) ; il est intéressant de noter que ces proportions sont similaires à celles observées dans des réunions de conception en face à face (par ex. d'Astous, Détienne, Visser, & Robillard, 2004), de même que le sont les séquences typiques de successions observées au travers de réponses et des citations (par ex. séquences evaluation-> évaluation ; proposition-> évaluation ; clarification->clarification). Il y a enfin une focalisation thématique des discussions sur le problème traité, toute dérive thématique étant sanctionnée et arrêtée rapidement par les administrateurs ou le chef de projet. Il s'agit là d'une probable spécificité des communautés de conception en ligne, alors que l'observation de dérives thématique est récurrente dans les communautés associées aux forums ouverts de discussions.

3.4.2.4.4 *Une étude sur 6 ans de l'émergence et des échanges autour d'une idée portée par les utilisateurs*

Cette deuxième étude visait à retracer les échanges et les interactions entre participants l'émergence d'un besoin exprimé par les utilisateurs. La méthodologie suivie pour identifier une idée et construire le corpus d'analyse est la suivante.

Méthodologie. 14 entretiens semi-dirigés ont été menés avec des membres de la communauté Python en France et aux Etats-Unis, afin d'identifier des « idées » de conception « poussée par les utilisateurs ». L'idée concernait l'introduction du type décimal dans Python et du module associé decimal.py. Nous avons ensuite retracé l'histoire de cette idée de conception en recueillant l'ensemble des discussions en ligne, relatives à ce problème de conception, sur les deux principales listes du projet Python: la liste orientée utilisateurs python-list et la liste orientée développeurs python-dev. Ces discussions sont archivées et accessibles publiquement ; elles constituent ainsi des traces riches du processus de conception.

L'idée a donné lieu à deux processus de discussions successifs. Le premier a conduit à un abandon (rejet du besoin dans le cadre de la procédure de discussion propre au langage désignée par les termes de PEP-

Python Enhancement Proposal ; Figure 7) alors que le second a inversement donné lieu à l'acceptation puis à l'intégration dans le logiciel (Figure 8).

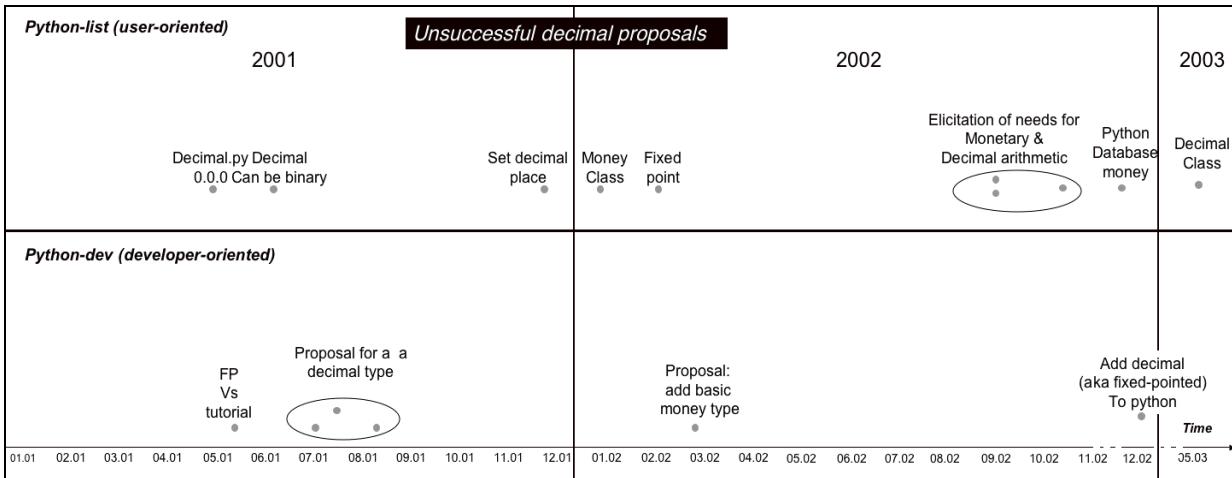


Figure 7. Représentation temporelle et spatiale des discussions ayant abouti à un échec de la proposition « decimal » extraite du corpus de deux listes python-list (liste orientée-usage) and python-dev (liste orientée conception) de la communauté Python.

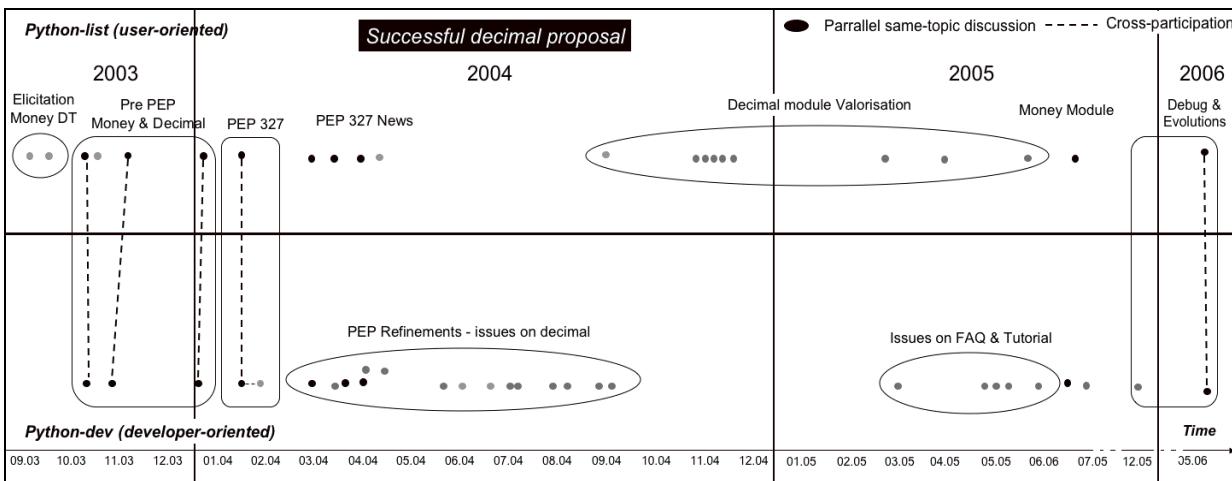


Figure 8. Représentation temporelle et spatiale des discussions ayant abouti à l'adoption de la proposition « decimal » dans les deux listes python-list (liste orientée-usage) and python-dev (liste orientée conception) de la communauté Python.

Ce deuxième processus (cf. Barcellini, Déttienne et al., 2006b pour une description détaillée) est pris en charge par un utilisateur de Python (prenant l'étiquette de « champion » de la proposition). Il se traduit par la migration d'un besoin au travers d'une succession de collectifs de conception (Figure 9), se caractérisant par des participants identifiés (par ex. l'utilisateur devenu champion) et par des espaces instrumentés où il est progressivement raffiné, décomposé et réalisé : le besoin initial d'un type « money » dans le domaine d'application financier de la galaxie Python (<http://sourceforge.net/projects/sigefi>), la discussion et la conception d'un module décimal (dans le cœur du langage de programmation Python) puis la spécification d'un module « money » (au cours de conférences en face-à-face) et sa réalisation au sein d'un nouveau projet (PyMoney) développé sur la plateforme sourceforge. A cette étape, le besoin est pris en charge par une communauté s'étant munie d'outils propres pour le travail à distance. Ce processus correspond aussi à l'évolution de l'utilisateur « champion » pour ce besoin, qui du statut d'utilisateur va ultérieurement acquérir le statut de développeur du langage python, i.e. être coopté pour avoir des droits de modification sur le code python.

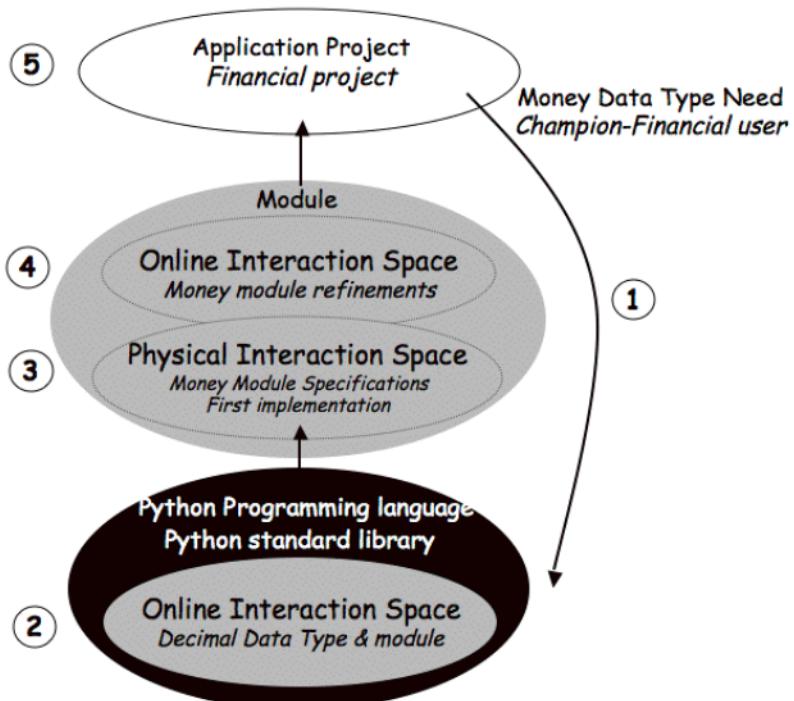


Figure 9. Formalisation des espaces et étapes d'un processus réel d'intégration d'un besoin utilisateur dans le langage Python (d'après Barcellini, Détienne et al., 2006b)

Nous avons comparé les principaux éléments qui semblent distinguer ces deux cas de discussions conduisant à une issue opposée en termes d'élaboration et d'intégration du même besoin, à l'aide de la méthode d'analyse développée auparavant pour étudier l'activité dans ces communautés (Barcellini, Détienne et al., 2005a, 2005b ; Barcellini, Détienne, Burkhardt et al., 2006 ; Sack et al., 2006).

Les résultats montrent que le profil des participants ne diffère pas suivant la liste (orientée-usage vs. orientée-conception), quelle que soit l'issue (échec vs. succès), dans l'émergence et la prise en compte du besoin : **les utilisateurs sont plus nombreux dans la liste orientée-usage**, tandis que **les développeurs sont les plus représentés en nombre dans la liste orientée-conception**. Ce résultat est stable et général, dans la mesure où il réplique les résultats observés lors d'autres discussions de ce même projet, témoignant ainsi d'une conscience et d'un respect par les participants de la répartition des activités entre les différentes listes.

Inversement l'analyse du nombre de messages postés montre notamment deux différences.

Les **utilisateurs participant plus fortement** (en nombre de messages) dans la liste de discussion orientée-conception **dans le cas de la proposition acceptée** que dans le cas de la proposition finalement rejetée. Ce résultat peut être interprété comme un rééquilibrage du point de vue des échanges entre les utilisateurs et les concepteurs, plutôt majoritaires dans la liste orientée-conception. Ce taux de participation plus élevé pourrait éventuellement s'expliquer par le fait que l'utilisateur champion les associe dès le début du processus de conception en postant des messages sur la liste orientée usage qui touchent un plus grand nombre d'utilisateurs potentiels.

Dans le cas où le processus conduisant à l'adoption du besoin est un succès, **on remarque également la présence de 5 participants d'interface** (« cross-participants »). Ces participants d'interface (ou encore « frontières » en ce qu'ils font le lien entre un espace « usage » et un espace « conception » de la discussion) se distinguent parce qu'ils **postent plusieurs fois dans les deux listes** (orientée-usage et orientée-conception) au cours de la discussion. Le rôle de ces participants d'interface est massif dans la mesure où ils postent près de la moitié des messages dans les deux listes, dans le cas du processus de discussion se soldant par le succès de l'idée de type « décimal » dans le langage Python. Dans le cas où la discussion n'aboutit pas, on observe inversement l'absence de tels participants d'interface.

3.4.2.4.5 Conclusion : l'analyse des échanges et de la participation montre l'existence d'acteurs frontières, d'espaces frontières et d'objets frontières

L'intégration des résultats de nos différentes études montre plusieurs points.

Dans le processus de conception distribué de logiciels libres étudié, les activités sont réparties à la fois entre des espaces et entre des participants.

Les participants se distinguent selon l'activité qu'ils mettent en œuvre relativement au langage : développement du langage python vs. utilisation du langage pour des logiciels dans ces domaines d'application (jeu, bioinformatique, finance, etc.). Les seconds constituent les « utilisateurs » de Python. Ils se caractérisent souvent par des compétences en informatique, ainsi que par un rôle cognitif et épistémique comme nous avons pu le montrer au travers de nos analyses. Ils réalisent ainsi essentiellement des activités d'évaluation et de clarification, et apportent préférentiellement des connaissances liées à des expériences personnelles dans les domaines d'application ou dans le domaine informatique. De ce point de vue, les utilisateurs semblent participer clairement à un processus de fourniture de connaissances sur les besoins liés à leur expérience propre d'utilisateur.

De façon orthogonale, les espaces diffèrent selon la nature des activités : discussion, documentation et implémentation. Les données montrent en effet que ce ne sont pas les mêmes participants qui prennent en charge les activités relatives à un même problème dans ces différents espaces. Il y a une séparation de fait, liée aux outils, entre d'une part, les espaces de contribution technique de type gestion de versions (CVS, subversions etc.) et, d'autre part, les espaces de discussion structurés en listes (par ex. liste orientée-usage « python-list » et liste orientée-conception « python-dev »).

La mise en place d'échanges entre les deux espaces de discussions orienté-usage et orienté-conception semble dépendre de la présence de participants frontières – ou d'interface – dans la discussion. Ces profils particuliers de participants contribuent en effet au travers d'activités de médiation, d'apports croisés de connaissances dans les deux domaines (application vs. conception) à destination des deux listes (usage vs. conception), fournissent des synthèses et ont une forte activité de soutien vis-à-vis de l'utilisateur champion.

Ce travail a permis de mieux comprendre l'organisation des discussions et des échanges de connaissances entre les participants à un projet de logiciel libre de grande taille. Il a permis de décrire, pour la première fois, le fonctionnement de la conception distribuée dans les communautés du logiciel libre. Ce travail nous a également permis de proposer une analyse des barrières à l'efficacité de la conception et de la collaboration dans ces types d'organisation (Barcellini et al., 2007a ; Barcellini, Détienne, & Burkhardt, 2008 ; Barcellini et al., 2009c ; Détienne, Barcellini, & Burkhardt, in press ; Détienne, Burkhardt, & Barcellini, 2006), parmi lesquelles l'établissement d'une conscience sociale et d'une conscience de la conception, la masse d'information disponible, les compétences, les contraintes temporelles, etc.

Enfin, ce travail a donné lieu à des apports méthodologiques sur la façon de traiter les données issues des masses de traces d'interaction en ligne, en combinant des analyses structurelles (participation, liens de citations, dynamique temporelle et répartition spatiale) dans les trois espaces d'activité mis en évidence, avec des analyses de contenu pour caractériser l'activité des participants (activités collaboratives de conception, apport de connaissances).

3.4.3 Apprentissage organisationnel et mémoires de projet : évidence fondée sur le terrain et réflexion sur l'outillage

Depuis plusieurs années, des recherches soulignent, dans des sphères variées de l'activité de conception et avec des approches différentes, la nécessité à l'échelle d'un métier, d'un collectif (les participants d'une équipe projet) voire d'une organisation plus vaste, d'acquérir tout ou partie des connaissances qui y sont produites. L'artefact ne constitue pas en effet - et de loin - le seul résultat d'un processus de conception. La conception utilise et produit aussi des connaissances qu'il convient de répertorier, de mémoriser et, le cas échéant, d'exploiter de façon opportuniste dans de nouvelles situations (Détienne, Rouet, Burkhardt, & Deleuze-Dordron, 1996). Ces connaissances sont à la fois techniques et humaines, individuelles et collectives, implicites et formalisées, empiriques ou scientifiques, réelles ou potentielles. Elles portent aussi bien sur le produit que sur le processus de conception et son environnement, y compris au travers d'aspects anecdotiques ou personnels sans lien direct avec la logique de conception.

Ces recherches portent sur l'apprentissage organisationnel et les mémoires de projet. Elles ciblent la création et la mémorisation de connaissances au-delà des projets particuliers et sur la durée de vie de l'organisation. Si je n'ai pas développé initialement de question de recherches sur ce thème, les résultats de certaines de nos études sur la maintenance automobile ont mis en lumière les difficultés à faire se développer cet apprentissage organisationnel et les conséquences de ces difficultés sur l'activité des opérateurs en premier front, entre autres les techniciens de maintenance. Le cadre théorique des communautés de pratiques s'est avéré des plus adaptés pour en rendre compte et extraire des spécifications ergonomiques pour la conception d'outils (Anastassova & Burkhardt, 2009).

L'objectif de ces recherches est d'améliorer les compétences individuelles et les compétences de l'organisation à travers le temps, les connaissances élaborées par et au cours de la conception étant vues comme un enjeu d'apprentissage tant au niveau individuel qu'au niveau des organisations. La relation entre conception et apprentissage y a par conséquent au moins deux plans : l'apprentissage est considéré à l'échelle du collectif – l'organisation –, d'une part, et le développement individuel est également considéré, d'autre part. Ce dernier point renvoie au développement de ses propres compétences.

3.4.3.1 Apprentissage organisationnel et maintenance automobile

Les difficultés concernant le cadre de l'apprentissage organisationnel ont été mises en évidence dans l'une des études menées avec M. Anastassova, dans le cas de la production d'outils et d'actions pour la formation professionnelle (Anastassova & Burkhardt, 2009). Une première étude avait mis notamment en exergue l'origine diversifiée des difficultés rencontrées par les techniciens de maintenance automobile en garage : sophistication croissante des connaissances requises (introduction massive de l'électronique et de l'informatique embarqué), formations perçues comme trop courtes, importance de l'apprentissage informel et du rôle des collègues dans la résolution des pannes, ambivalence vis à vis des technologies d'assistance (documentations, hotline, systèmes experts) parfois génératrices de coûts et de difficultés (par ex. information non à jour sans que le technicien en soit averti), formations elles-mêmes parfois en décalage ou incomplètes sur les nouveaux modèles, etc. Cette étude, qui s'inscrivait dans un projet initialement centré sur l'assistance au technicien de maintenance à son poste de travail, a été orientée in fine sur l'outillage des formateurs et des situations de formation. Avant d'en arriver à ce nouvel objectif, deux études ont montré la pertinence d'aborder la question de la création et la diffusion de l'information au sein d'un système organisationnel complexe, en adoptant le cadre théorique des communautés de pratiques (Anastassova & Burkhardt, 2009). En effet, considérer le seul niveau de la formation du technicien est vite apparu peu pertinent et en décalage avec la réalité complexe du réseau de déterminants des difficultés observées, même si les techniciens expriment leurs difficultés en termes de déficit de connaissances et d'une demande de formation. Ces deux études sont présentées à la suite.

3.4.3.1.1 La conception de véhicule : un système socio-organisationnel incluant l'artefact, la documentation et la maintenance

Une première étude, menée par entretiens auprès de 6 formateurs, 6 concepteurs du matériel de formation et 11 techniciens participant en tant que stagiaires à une formation ($N=23$) a d'abord mis en évidence le réseau complexe connectant un grand nombre d'acteurs et donnant lieu à des processus d'apprentissage à la fois ascendant et descendant (Figure 10).

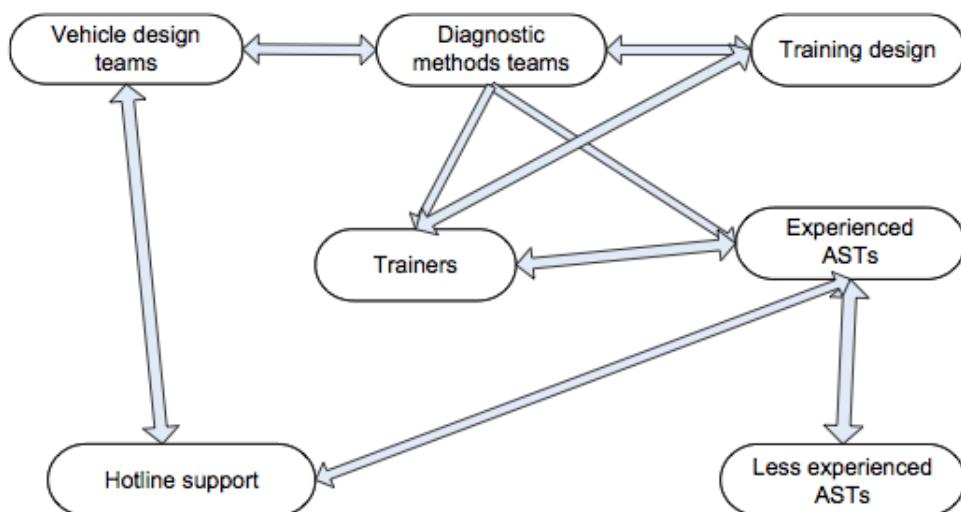


Figure 10. Réseau des acteurs et des échanges de connaissances concernant la maintenance en lien avec l'évolution des technologies et l'introduction des nouveaux modèles de véhicules (Anastassova & Burkhardt, 2009). La dénomination AST (Automotive Service Technicians) renvoie aux techniciens de maintenance automobile. « Training design » désigne l'équipe concevant le matériel pédagogique et la formation à la maintenance. « Trainers » se réfère au collectif des formateurs.

Ce système socio-organisationnel peut être assimilé à une communauté de pratique dans la mesure où une information en constante évolution circule à l'intérieur de cercles sociaux et organisationnels dont les

membres sont inter-reliés et mutuellement dépendants (Anastassova & Burkhardt, 2009). Il y a d'une part une voie de diffusion descendante des connaissances, vers les techniciens au travers des documents de maintenance et des formations, lesquels sont conçus par un circuit mettant en relations les concepteurs du bureau des méthodes, les concepteurs de la documentation et les formateurs. Il y a, d'autre part, un circuit ascendant de diffusion vers les concepteurs, reposant sur le fait que l'information et certaines connaissances concernant les problèmes et les solutions éprouvées sur le terrain leurs sont transmises via les retours recueillis par les formateurs au moment des sessions de formation, d'un côté, et au travers de l'assistance en ligne (hot line) de façon plus directe, de l'autre côté. Le rôle de cette dernière est en effet d'aider les techniciens en cas de problème inhabituel et de collecter les pannes et problèmes afin de les transmettre aux ingénieurs concernés par la conception du véhicule.

A cette organisation très répartie s'ajoute la contrainte de production en juste-à-temps, avec comme conséquences majeures pour l'accès des techniciens à des connaissances concernant les modèles et les problèmes les plus récents, de générer des difficultés qui s'entrecroisent pour l'ensemble des acteurs :

- pour les **concepteurs des documents** de formation : difficulté à obtenir les informations techniques exactes pertinentes et à jour auprès des autres acteurs ; contrainte de temps forte pour la production des documents ; nombre insuffisant de prototypes pour tester les procédures ; difficultés de mise en forme, voire de traduction, des documents techniques issus de la conception pour qu'ils soient exploitables et intelligibles en formation ;
- pour les **techniciens en formation** : caractère trop court de la formation en salle comme en ateliers, contenu perçu comme trop théorique, peu en phase avec les problèmes et difficultés à traiter sur le terrain ;
- pour les **formateurs** : absence de pièces et de ressources concrètes exploitables concernant les modèles les plus récents ; temps également perçu comme trop court pour la formation- de façon analogue aux techniciens venant en formation ; information erronées dans la documentation ; délais dans la livraison des pièces et des documents ; divergences multiples entre les sources liées au fait que les véhicules et les informations diffèrent selon les documents et protagonistes (par ex. les documents de formation sont conçus sur la base d'un premier prototype de véhicule, puis c'est une seconde version qui est mise en œuvre en formation – différente de la précédente – et enfin, les deux sont elles-mêmes différentes des véhicules effectivement mis en service auprès des clients, ceux-la même qu'auront à prendre en charge les techniciens).

Dans le même temps, l'analyse des stratégies et ressources mises en place dans la communauté pour pallier les difficultés précitées montre le recours important aux autres acteurs comme ressources (pairs, hiérarchie, collègues) s'appuyant le plus possible sur les connaissances et l'expérience ainsi mobilisables pour assurer la conception puis la délivrance de la formation.

3.4.3.1.2 Propriétés des ressources impliquées dans la formation à la maintenance selon la perspective de l'apprentissage organisationnel

La deuxième étude a été réalisée au travers de l'observation de 7 sessions réelles de formation (correspondant à 3 formateurs différents) concernant certains aspects innovants de nouveaux véhicules (52 h). Deux types de ressources ont été mis en évidence, avec une prédominance de la seconde. Les ressources matérielles, d'une part, correspondent aux artefacts matériels (documents pour la formation, diaporama, tableau blanc, pièces physiques). Les ressources interactionnelles consistent en divers modes de mobilisation des capacités au sein du collectif en vue de faire évoluer les connaissances mises en question: questionner, fournir une information, donner une explication, etc.

L'analyse s'est centrée d'une part sur l'articulation des différentes ressources interactionnelles exploitées par le formateur et les techniciens tout au long d'une session de formation, ainsi que les buts poursuivis au travers de la mobilisation de ces ressources. On y voit par exemple qu'une ressource interactionnelle comme le questionnement est certes mobilisée par les formateurs pour évaluer les connaissances des stagiaires, mais qu'il en est aussi fait un large usage par le formateur pour faire remonter et acquérir de l'information sur les problèmes et les modes opératoires effectifs sur le terrain. Les stagiaires utilisent également cette ressource pour recueillir d'autres informations sur les pratiques de terrain auprès des collègues. D'autres ressources interactionnelles sont utilisées par les deux catégories d'acteurs (action, explication etc.), répondant alors à des objectifs différents. Il en découle une représentation de l'activité au sein du collectif apparaissant comme un entrelacement dynamique de buts et de ressources mobilisées tour à tour par les deux catégories d'acteurs durant la séance. Ce type de fonctionnement a par conséquent très peu à voir avec un modèle descendant classique de la formation supposant la définition d'objectifs en amont et la traduction de ces objectifs au travers d'un exposé traduisant une information correcte et pertinente

préalablement identifiée. Nous avons par ailleurs réalisé une analyse exploratoire des relations entre les ressources matérielles et les buts, au moyen d'une analyse des correspondances. Deux axes (100% de l'inertie expliquée) ont ainsi été mis en évidence concernant les ressources matérielles exploitées en situation de formation. Le premier axe représente l'opposition entre les ressources fournies au formateur mais qu'il perçoit comme insuffisantes, ce qui le conduit à les adapter ou les modifier, d'un côté, et les ressources dont il ne dispose pas a priori mais qu'il perçoit comme nécessaires, ce qui le conduit à en apporter lui-même de supplémentaires (en particulier sous la forme d'annotations). Le second axe oppose les documents techniques (uniquement utilisés pour la discussion) aux autres ressources, ce qui nous a conduit à l'interpréter comme l'opposition entre des ressources matérielles utilisables dans un seul but par rapport aux ressources flexibles autres qui peuvent être mobilisées dans plusieurs contextes et dans le contexte de la poursuite de plusieurs buts. Par exemple, une pièce mécanique peut être utilisée pour la démonstration, l'explication mais aussi la résolution d'une panne.

3.4.3.1.3 Conclusion

Cette double analyse du fonctionnement d'une communauté autour de la question de la conception nous a permis de proposer des préconisations en termes d'usage possible des technologies de la réalité augmentée pour assister les formateurs. Le lecteur intéressé par le détail de la méthode et des résultats pour les deux études est invité à consulter notamment Anastassova et Burkhardt (2009).

3.4.3.2 Outilage de la mémoire de projets dans les communautés de conception en ligne

Une des difficultés de l'entrée et de l'intégration dans les projets de conception en ligne réside dans la masse importante d'information produite au cours du temps à traiter. Qui plus est, cette information est répartie à la fois dans des espaces différents et au travers de contributions de multiples participants. Il s'agit là d'une des barrières majeures à la participation dans la conception de logiciels libres (Barcellini, Détienne, & Burkhardt, 2008 ; Barcellini et al., 2009c). L'outilage de la mémoire de projets a ainsi été initialement une motivation pour étudier les discussions de conception dans les communautés de conception des logiciels libres. Ce projet a été mené dans le cadre d'une collaboration avec W. Sack (Université de Californie) afin de travailler sur un outil d'analyse et de représentation des discussions en ligne.

3.4.3.2.1 Exploiter les relations de citation dans les discussions de conception

Nous avons ainsi montré (Barcellini, Détienne et al., 2005a, 2005b) dans le contexte des discussions en ligne, que l'utilisation des liens de citations entre messages permettait une reconstruction plus complète et plus pertinente de la logique argumentative, par comparaison avec l'utilisation (généralement adoptée) du lien de réponse dans un fil de discussion (Figure 11). La comparaison systématique de la structure des messages découlant du lien de citation (i.e. A cite B) avec la structure obtenue en suivant les liens de réponse dans le fil (A' répond à B') nous a ainsi permis de montrer que les liens de citation amènent à construire une représentation plus cohérente de la discussion (Barcellini, Détienne et al., 2005b). En effet, la prise en compte des citations permet de reconstruire un seul arbre au lieu de plusieurs fils de discussion disjoints. Les liens de citation font apparaître un plus grand nombre de relations entre les messages : il y a au mieux une seule relation « réponse à », tandis qu'un même message peut citer (ou être cité par) plusieurs messages. Enfin, la position des messages à l'intérieur de la discussion s'avère qualitativement et quantitativement en meilleure cohérence avec l'évolution argumentative.

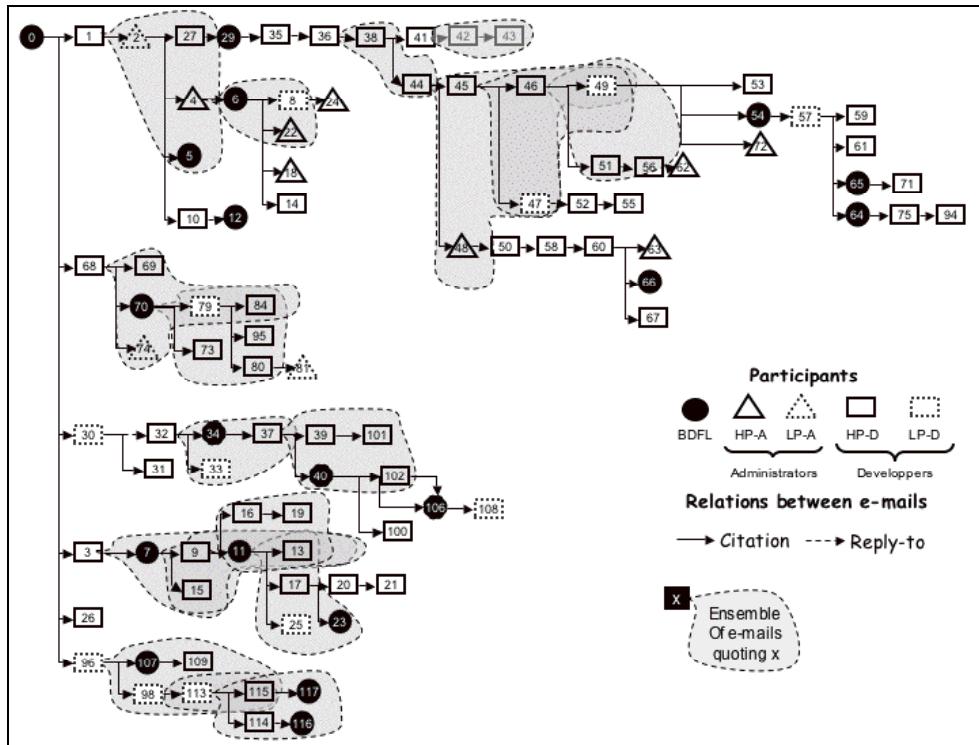


Figure 11. Représentation graphique d'une discussion de conception en ligne à l'aide du lien « est cité par » figurant les thèmes abordés dans le contenu des messages et les catégories de participants (Barcellini, Détienne et al., 2005b).

3.4.3.2.2 Perspectives

Une première perspective de ce travail concerne la recherche et la mise au point d'un outil utile et utilisable permettant de prendre en compte non seulement les liens de citations mais aussi certains marqueurs lexicaux de l'activité présents dans les messages, en s'appuyant sur les technologies actuelles en termes de traitement et de visualisation de données.

Il reste également à démontrer l'intérêt opérationnel de tels outils au sein d'une communauté. De plus, les conséquences sont peu claires concernant le fait de permettre à des participants (en particulier nouveaux dans le projet) de visualiser les rôles ou les fonctions d'autres participants dans les différentes dimensions de l'activité d'un projet. Il reste la encore beaucoup d'interrogations et d'investigations potentielles.

3.5 Conclusion et perspectives concernant le lien entre conception et apprentissage

Cette partie a proposé un aperçu d'approches des notions et dimensions de l'apprentissage lorsque l'on s'intéresse à l'ergonomie des activités de conception. Ma trajectoire personnelle n'a pas été de développer systématiquement une approche visant l'intégration de ces dimensions variées de l'apprentissage (d'où les deux chapitres sur l'utilisation et la formation qui suivent). Toutefois, j'ai voulu montrer ce premier ancrage d'une partie de mes travaux dans certaines des dimensions d'analyse de l'apprentissage liées au collectif, en particulier dans le contexte de collectifs de conception plus ou moins larges et clairement délimités, et dans un contexte d'émergence technologique pour les opérateurs/utilisateurs concernés.

J'ai voulu montrer aussi en quoi la question des apprentissages au sein d'un collectif de conception renouvelle en partie les questions de méthodologie pour l'ergonome. Ainsi, cette phase importante de l'orientation des projets que constitue l'analyse et la co-construction des besoins est peu étudiée, et les outils dont dispose l'ergonome sont au final peu évalués. D'autres travaux devront être réalisés sur cette question. Je note, en parallèle que l'activité liée à la mise en œuvre de ces méthodes reste aussi, pour beaucoup d'aspects, assez peu documentée. Par exemple, l'activité de modélisation des tâches a donné lieu à quatre études empiriques publiées en tout et pour tout, à ma connaissance, comme l'avait montré une étude de master recherche en Ergonomie que j'avais encadré (Couix, 2007). La reconnaissance d'un nécessaire apprentissage mutuel croisé change d'ailleurs en partie la façon d'aborder les questions associées à l'analyse des besoins et aux activités de conception. Par exemple, la capacité d'une méthode

ergonomique à produire un résultat qui puisse être partagé et exploité par le collectif devient aussi centrale que la seule qualité du résultat qu'elle produit.

3.5.1 Renforcer la prise en compte des dimensions de l'apprentissage et du développement individuel dans l'étude des activités de conception

Envisager l'apprentissage comme un processus au cœur de l'activité et du développement humain invite également à tester d'autres modèles et approches de l'étude de l'activité de conception, y compris lorsqu'on se centre sur la cognition individuelle. Par exemple, les analyses de l'activité des concepteurs sont souvent centrées sur les seules productions en termes de solutions et documents divers. Les caractéristiques de ces productions sont ensuite interprétées en termes de connaissances (préexistantes) mobilisées ou du raisonnement qui les manipule. Il pourrait être fructueux de s'intéresser alternativement aux apprentissages réalisés par les concepteurs tout au long des projets. Comprendre quelles connaissances sont produites, à quels moments, par qui et pour quelle(s) raison(s), ainsi que les facteurs qui affectent cette activité au niveau de l'organisation et des individus, pourraient en effet constituer des pistes d'élargissement des approches en ergonomie.

3.5.2 Vers un outillage plus ergonomique des recherches et des pratiques de la conception distribuée à distance et dans le domaine du logiciel libre

Les évolutions récentes des modes d'organisation et d'outillage de la conception constituent un terrain de nouvelles interrogations et de nouvelles études. Elles sollicitent en retour la conception pour pouvoir proposer, sur la base de l'analyse des activités des participants à la conception, de nouveaux outils et une meilleure assistance. En particulier pour ce qui est des communautés de conception en ligne, des outils pourraient permettre d'assister, voire d'automatiser en partie, l'extraction des traces d'interaction, leur organisation, les traitements de type structuraux (par ex. les citations) et les traitements de contenu. D'une part, cela peut ouvrir la voie à des analyses systématiques plus étendues et plus complètes (voire exhaustives) de ces vastes quantités de traces liées à l'activité, alors que le coût actuel de telles analyses, pour le chercheur, rend difficile leur réalisation. D'autre part, en vue de faciliter les apprentissages mutuels et la construction d'une conscience sociale et de situation, de tels outils pourraient offrir de meilleures alternatives, comparativement aux outils actuels de type plateforme, forums et listes de diffusions. Une telle démarche requiert à l'évidence un travail de recherche interdisciplinaire en sciences cognitives.

3.5.3 Vers une ergonomie des activités en lien avec l'innovation

Enfin pour conclure, il est permis d'élargir la question de la conception à celle de l'innovation, dans le domaine des technologies émergentes. Comme je l'ai dit en introduction, les deux notions ne sont pas synonymes. Une conséquence pour l'ergonomie pourrait être de s'intéresser conjointement au processus de conception et à ses relations avec le processus de diffusion. Notamment, il serait intéressant de comprendre les interdépendances réciproques et les contributions potentielles que l'ergonomie pourrait apporter aux deux processus, avec l'objectif d'améliorer les conditions de l'activité, du développement humain, et des apprentissages en tant qu'ils constituent des enjeux à de multiples niveaux dans et pour la conception.

Utilisation et apprentissage

4 Utilisation et apprentissage

4.1 Introduction

Ce chapitre traite de la façon dont la dimension apprentissage est aujourd'hui abordée dans les approches ergonomiques de la conception des systèmes interactifs et des technologies émergentes. Peu de travaux évoquent de façon directe la question du lien entre utilisation et apprentissage, à l'exception de ceux menés dans le domaine des technologies spécifiquement dédiées à la formation et à l'apprentissage telle que les « environnements interactifs pour l'apprentissage humain – EIAH. Parce qu'orientés vers la formation, ces derniers sont traités dans la partie suivante intitulée « Formation et apprentissage ».

Le chapitre est organisé de la façon suivante.

Je propose tout d'abord une synthèse des liens et des différences entre **utilisation** et **apprentissage** tels qu'ils apparaissent en ergonomie de la conception des systèmes interactifs et des technologies émergentes. Dans leur grande majorité, les travaux semblent s'être focalisés sur la seule dimension **d'utilisation** que l'on peut définir comme l'emploi ou la manière d'utiliser un dispositif. L'angle privilégié est alors celui de **l'utilisabilité**, c'est-à-dire de la facilité d'utilisation du dispositif. Faciliter l'utilisation se traduit assez généralement par l'objectif de diminuer la charge de travail pour l'utilisateur (par ex. en termes de quantité d'information à mémoriser, d'apprentissage des commandes, de nombre d'opérations à effectuer, de temps de réalisation, d'erreurs potentielles à gérer) et/ou d'augmenter la performance de l'utilisateur dans sa tâche. Les aspects d'apprentissage y sont de fait assez rarement considérés, si ce n'est à travers la notion « **d'apprenabilité** » (par ex. Nielsen, 1993) ou comme **objectif opposé à la facilité d'utilisation** (par ex. Drapper, 1998 ; Wickens, 1992). Enfin, une troisième voie empruntée par quelques auteurs considère que **l'utilisation est une activité qui peut produire de l'apprentissage et du développement chez les personnes utilisatrices** (par ex. Vicente, 1999 ; Carroll, 1990).

La section suivante rappelle deux principaux types de travaux empiriques sur l'utilisation et l'apprentissage en lien avec l'utilisation, évoque quelques résultats parmi les principaux et conclut sur deux façons possibles de considérer, en ergonomie des technologies émergentes, les dimensions de l'apprentissage et du développement en lien avec l'utilisation.

Je présente ensuite deux groupes d'études menées dans l'objectif de contribuer empiriquement à ces deux façons d'aborder la question des relations entre utilisation et apprentissage. Le premier groupe a en commun de s'intéresser à « comment » et « avec quelle efficacité » se déroule **l'apprentissage de l'utilisation** de certains dispositifs issus des technologies émergentes. Le second groupe rassemble les études qui portent sur ce qu'il est possible **d'apprendre ou d'acquérir comme information, au travers de l'utilisation d'un dispositif** ou d'une structure d'information. Je finis ensuite sur quelques perspectives qui me semblent ouvertes par la considération accrue pour l'apprentissage et le développement au travers de l'utilisation, dans le champ des technologies émergentes.

4.2 Ergonomie des technologies émergentes : liens entre l'utilisation et l'apprentissage ou le développement (synthèse)

Il y a trois perspectives partiellement différentes sur la question du statut de l'utilisation par rapport à la notion d'apprentissage chez l'utilisateur. Ces perspectives renvoient d'une certaine façon à deux conceptions opposées du lien entre apprentissage et utilisation.

La première conception considère l'utilisation (plus exactement la facilité d'utilisation) et l'apprentissage comme deux processus s'excluant mutuellement chez l'utilisateur ou l'opérateur. A l'intérieur de cette conception, deux perspectives s'opposent à leur tour quant à la primauté à donner à l'un ou à l'autre des deux processus :

- privilégier l'utilisation, sous l'angle de la réutilisation de l'expérience passée, et limiter voire supprimer la nécessité pour l'utilisateur d'avoir à réaliser un nouvel apprentissage ; cette première perspective, illustrée au travers de la notion **d'apprenabilité**, est majoritaire en ergonomie informatique et dans le champ de la conception centrée-utilisateurs des nouvelles technologies ; elle tend à restreindre l'apprentissage aux seules connaissances décrivant l'utilisation sous l'angle de l'interaction avec l'outil ;
- privilégier l'apprentissage ; cette seconde perspective considère qu'apporter un trop fort soutien à l'utilisation au moyen de l'interface est incompatible avec le fait de susciter de l'apprentissage et de

favoriser le développement d'une meilleure compréhension des outils et de l'environnement de la part de l'utilisateur.

La conception alternative considère que l'utilisation est une opportunité pour l'apprentissage, les deux processus pouvant (devant) être associés de façon efficace. Cette perspective considère que l'apprentissage et le développement des compétences peuvent découler de l'utilisation c'est-à-dire de l'activité développée par l'utilisateur au moyen de l'interface. Les moyens et les approches pour faciliter de tels apprentissages au travers de l'utilisation constituent alors la question importante pour l'ergonomie.

4.2.1 L'apprenabilité : une mesure du coût de l'apprentissage lié à l'interaction Utilisateur/Système

4.2.1.1 Définition

L'apprenabilité (« learnability ») est une dimension constitutive de l'utilisabilité qui designe le fait qu'un utilisateur puisse rapidement commencer à utiliser l'interface pour atteindre ses buts et compléter la tâche (Nielsen, 1993). Un système est en effet d'autant plus facile à utiliser qu'il est simple et rapide de prise en main. La mesure de la performance proposée généralement pour opérationnaliser cette dimension de l'apprenabilité est **le temps nécessaire à un utilisateur pour être capable d'utiliser le plus grand nombre de fonctions d'un dispositif**. Plus ce temps est court, meilleure est alors l'apprenabilité du dispositif. L'apprentissage y est par conséquent considéré sous l'angle de l'acquisition individuelle des connaissances requises pour l'utilisation du dispositif. Ainsi définie, l'apprenabilité se distingue de l'utilisabilité dans la mesure où cette dernière correspond au temps nécessaire pour réaliser un nombre donné de tâches.

Le rôle de l'environnement social, comme le rôle de variables telles que la motivation ou l'utilité perçue sont peu abordés dans la littérature en ergonomie des technologies émergentes, celle-ci se focalisant sur les bonnes propriétés que doivent avoir le logiciel et le dispositif technologique du point de vue du coût de l'apprentissage :

« Learnability concerns the features of the interactive system that allow novice users to understand how to use it initially and then how to attain a maximal level of performance (Dix, Finley, Abowd, & Beale, 1998, p. 162).

La problématique des mécanismes cognitifs sous-jacents à cette façon de considérer l'apprentissage de l'utilisation a été théorisée par quelques auteurs. Deux principaux cadres théoriques ont été proposés pour expliquer, voire prédire, le coût et les difficultés liées à un tel apprentissage. Le premier (CCT - Cognitive Complexity Theory ; Kieras & Polson, 1985) assimile l'apprenabilité à la **proportion d'une procédure connue qu'il est possible de transférer à la nouvelle procédure** (d'utilisation). Le second semble plutôt assimiler l'apprenabilité à une mesure de la **distance entre buts et moyens** faisant intervenir un mécanisme de catégorisation des objets dans le processus de transfert/selection de l'action. Dans les deux approches, l'apprentissage considéré se focalise sur des connaissances décrivant l'interaction entre un utilisateur individuel et un système.

4.2.1.2 Proportion de la procédure connue transférable à la nouvelle procédure d'utilisation

Cette première approche de l'apprenabilité est l'application, au champ de l'interaction humain-machine, de l'idée de **transfert d'apprentissage entre des connaissances procédurales**. Proposée par Kieras & Polson (1985) sous la dénomination CCT (Cognitive Complexity Theory), ce cadre vise à prédire une performance connaissant la structure de la procédure connue a priori par le sujet (par ex. la procédure d'effacement sur un éditeur de texte A) et la nouvelle procédure à acquérir (la même tâche à accomplir sur le nouvel éditeur B). En effet, l'idée formalisée dans CCT est que le temps d'apprentissage d'un nouveau dispositif B dépend, d'une part de la proportion des règles d'actions de A transférable pour opérer le nouveau dispositif B et, d'autre part, de la quantité de règles nouvelles à apprendre pour opérer B. De ce point de vue, CCT a beaucoup de similitudes avec les approches et les résultats de modèles à l'ambition plus large comme ceux de la famille ACT* (Adaptive Control of Thought ; voir en particulier Singley & Anderson, 1989 ; Byrne, 2003).

Pour prédire une performance, CCT s'appuie sur la formalisation des connaissances procédurales d'un utilisateur au moyen d'une description des deux procédures sous la forme d'une hiérarchie de buts et méthodes GOMS (Goals, Operators, Methods and Selection rules) transformées ensuite en un ensemble de règles de production (Bovair, Kieras, & Polson, 1990 ; Card, Moran, & Newell, 1983; John & Kieras, 1996a,

1996b). Le temps d'apprentissage est ensuite calculé directement en comptant le nombre de règles nouvelles devant être apprises que multiplie une valeur constante.

Une limite de CCT, dans la pratique, est qu'il concerne un aspect restreint de l'acquisition d'une nouvelle procédure. En effet, les connaissances représentées concernent le contrôle de l'exécution de la procédure (structure des buts, d'une part, et opérations à appliquer, par ex. sélection d'un item dans le menu au moyen de la souris). Par conséquent, les connaissances concernant la réalisation de chaque opération à proprement parler n'y sont pas représentées. L'acquisition des connaissances procédurales caractérisant une « nouvelle » opération¹⁶ n'est pas considérée dans le modèle, de même que n'est pas considérée la mémorisation des connaissances déclaratives requises pour l'exécution des règles (par ex. label du menu sous lequel telle commande est rangée). Il en résulte que CCT n'inclut pas non plus le temps dévolu à la formation et à l'exercice dans son calcul de l'apprenabilité. Enfin, les tâches considérées sont généralement élémentaires et le modèle n'est pas sensible à des facteurs importants tel le contexte et les « autres » connaissances de l'utilisateur. Byrne (2003) souligne comme autre limitation importante de CCT le fait que la qualité de la prédiction du temps caractérisant le transfert de connaissances procédurales dépend de la qualité de l'analyse de chaque tâche et de l'homogénéité du style d'écriture des règles. Peu de travaux ont suivi cette direction, à l'exception de ceux sur le système AMME (Automatic Mental Model Evaluator ; Rauterberg & Aeppli, 1996).

4.2.1.3 Distance entre buts à atteindre et moyens disponibles

Richard (1983) propose la différence entre **logique de fonctionnement** et **logique d'utilisation** comme mesure de la distance à parcourir pour expliquer les difficultés associées à l'apprentissage de l'utilisation d'un dispositif. La logique de fonctionnement d'un dispositif correspond schématiquement à l'ensemble des règles qui décrivent sa logique interne i.e. l'ensemble des associations entre les commandes disponibles et leur effet. De façon inverse, la description du dispositif en termes de règles d'utilisation intervertit les termes de la règle, puisque l'utilisateur manipule les but/sous-buts de la tâche (i.e. l'effet attendu), qu'il doit traduire par le biais de commandes valides pour le dispositif.

Dans cette approche de l'apprenabilité, l'accent est mis sur le coût cognitif, pour le sujet utilisateur, d'avoir à transformer sa représentation de la tâche dans un domaine de problème particulier (par ex. le calcul d'une moyenne) dans une représentation compatible avec les contraintes du dispositif pour parvenir à la réaliser (par ex., une calculette). Pour Richard (1983, p. 34), « la difficulté essentielle dans l'utilisation d'un dispositif d'aide au traitement de l'information nous paraît résider en ceci que [l'utilisateur] (...) n'arrive pas à définir les sous-but appropriés, à construire une organisation de la tâche qui soit compatible avec les contraintes du dispositif ». Le passage de l'une à l'autre est ainsi loin d'être aisé, comme le montre la revue de Richard (1983) basée en grande partie sur des situations d'apprentissage ou de résolution de problèmes au moyen d'un dispositif de commandes relativement simple (calculatrice, langage de programmation simplifié). Les difficultés rapportées par l'auteur suggèrent que la généralisation des conclusions à des dispositifs de commandes plus complexes est grandement justifiable ; les résultats montrent en effet que pour des commandes simples et en quantité restreinte, l'utilisateur doit effectuer un travail cognitivement coûteux et difficile pour passer d'une représentation mentale du dispositif à l'autre. Cette difficulté s'accroît - pour des utilisateurs novices par exemple - dès lors qu'il s'agit de planifier l'utilisation du dispositif sous forme de séquences de commandes plus longues et complexes. En effet, la structure de buts que l'utilisateur utilise pour résoudre le problème n'est pas mise en correspondance directe et aisée avec la façon dont le système est structuré sur le plan des dépendances et des interactions qu'entretiennent les commandes du dispositif.

Dans ses évolutions récentes, ce cadre met l'accent sur le fait que, dans une situation problème, le déclenchement d'une action est dépendant en premier lieu d'un mécanisme de catégorisation contextualisée (Tijus, Poitrenaud, Bouchon-Meunier, & de Vulpillières, 2006). Cette approche se distingue ainsi des précédentes basées sur les règles de production, en ce qu'elle associe les actions et les procédures aux catégories d'objets comme propriétés de ces catégories (Figure 12). Les connaissances associées aux éléments du contexte sont décrites au moyen de réseaux hiérarchiques de catégories définies par l'action (cf. le formalisme ProCOpe ; Poitrenaud, 1995). Il en résulte un treillis dont **la complexité constitue alors un indicateur de la difficulté d'apprentissage du dispositif, i.e. l'apprenabilité** qu'il devient possible de prédire au moyen d'une métrique. Dans l'exemple donné en Figure 12, on peut ainsi parcourir le treillis pour simuler la distance/ complexité de la procédure « Avoir un fichier sur le bureau, le déplacer dans un dossier, ouvrir ce dossier et le refermer, insérer une disquette puis déplacer le dossier sur cette disquette, ouvrir la disquette pour vérifier son contenu et éjecter la disquette (Tijus et al., 2006).

¹⁶ Or cet aspect est important dans le contexte des technologies émergentes. En terme d'apprenabilité d'un environnement virtuel, par exemple, un problème important concerne l'acquisition des opérations liées à l'utilisation des nouveaux dispositifs par ex. souris 3D, bras à retour d'effort.

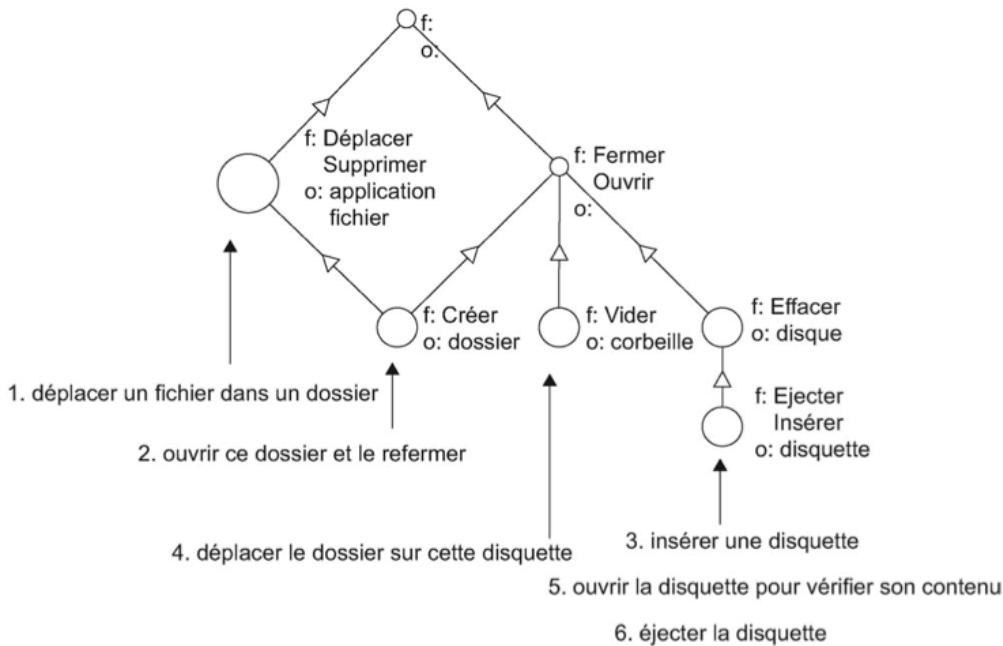


Figure 12. Exemple de treillis représentant les propriétés (f :) et les actions associées aux objets (o :) du « bureau » d'un ordinateur (d'après Tijus et al., 2006).

4.2.2 Utilisation et apprentissage : deux objectifs s'excluant mutuellement

Un point de vue assez majoritaire en ergonomie informatique considère ainsi l'apprentissage comme un mécanisme inutile, coûteux voire nocif pour l'utilisation. Selon cette conception, faciliter l'apprentissage (de l'interface) vise en d'autres termes à supprimer toute nécessité d'apprentissage. Le principal moyen proposé pour atteindre cet objectif réside dans la fourniture d'une interface qui maximise la possibilité d'une mobilisation de ses connaissances antérieures par l'utilisateur. Deux approches coexistent selon que l'origine des connaissances antérieures visées porte sur la tâche ou sur le domaine de l'informatique.

4.2.2.1 Privilégier l'utilisation en sollicitant les connaissances préalables de l'utilisateur en ce qui concerne sa tâche et son travail

Cette première approche consiste à concevoir les caractéristiques de l'outil en correspondance avec les structures mentales et le mode de régulation de l'activité de l'opérateur, l'idée étant de faire reposer l'activité d'utilisation sur les connaissances professionnelles préalables ou sur des objectifs « naturels » de l'utilisateur (par ex. Staggers & Norcio, 1993). Cette approche admet notamment deux présupposés.

Le premier présupposé est que tous les utilisateurs doivent partager des structures de connaissances fonctionnellement similaires, à défaut d'être identiques. D'autant plus que l'on s'intéresse à des experts, l'hypothèse d'une telle similitude des connaissances et représentations construites au cours de l'interaction avec le système est à considérer avec précaution. La psychologie et l'ergonomie cognitive soulignent depuis longtemps que le contenu et les caractéristiques fonctionnelles de la représentation mentale des sujets humains diffèrent en fonction de facteurs tels que l'expérience, l'expertise et la tâche à réaliser (ex. Bisseret, Sebillotte, & Falzon, 1999). Notamment à travers la notion d'image opérative (Ochanine, 1966), l'ergonomie cognitive a contribué à souligner le caractère déformé des représentations chez l'expert, qui sont souvent le fruit d'une économie cognitive qui lui permet de réaliser, très rapidement et, à moindres coûts, les tâches pour lesquelles il est entraîné. Comme le souligne Sperandio (1984, p. 84) 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'interfaces, il faut aussi que de telles représentations soient compatibles avec la diversité des utilisateurs possibles, et la diversité des objectifs d'actions. Enfin, une telle approche peut laisser penser qu'une telle représentation commune est stable et définitive, masquant ainsi l'apprentissage et le développement continu des utilisateurs non seulement vis-à-vis du système utilisé, mais plus largement du domaine technique et du métier dans lesquels s'inscrit l'utilisation de l'outil conçu.

Le second présupposé est qu'il doit exister des règles valides de traduction de ces connaissances au niveau de la conception de l'interface, de telle sorte que soit suscitée l'évocation par l'utilisateur de cette connaissance commune dans les situations et les contextes d'usage ciblés. Sur ce dernier point, je note juste ici que de telles règles éventuelles pour la transformation des résultats de l'analyse des représentations des utilisateurs vers la spécification du contenu, de l'organisation et du format de l'interaction, sont aujourd'hui encore peu établies.

4.2.2.2 Privilégier l'utilisation en sollicitant les connaissances et les habitudes d'utilisation de l'informatique

Cette seconde approche consiste à rechercher une standardisation des composants de l'interface et de l'interaction. Ce sont alors les connaissances sur l'utilisation des logiciels qui sont ciblées pour faciliter l'utilisation, puisque l'idée est de s'appuyer sur les connaissances préalables de l'utilisateur concernant un outil (ou une famille d'outils) informatique (s). Cette idée est reçue d'autant plus favorablement en conception qu'elle permet de maximiser la réutilisation des composants logiciels exploités dans les interfaces. Néanmoins, les problèmes liés aux différences entre les utilisateurs en ce qui concerne l'expertise dans le domaine de la tâche existent aussi en regard des différences d'expertises dans l'informatique. Trois autres problèmes s'ajoutent potentiellement :

- l'utilisateur professionnel peut être littéralement novice en ce qui concerne l'informatique - ou à tout le moins en ce qui concerne les modèles et les composants « réutilisés » au niveau de l'interface et de l'interaction ;
- il peut y avoir un certain degré d'incompatibilité entre, d'un côté les connaissances sur l'activité et le domaine professionnels et, de l'autre côté, les connaissances sous-jacentes aux modèles d'interface et d'interaction réutilisés au fur et à mesure de la standardisation ;
- faciliter le recours à une connaissance antérieure - par exemple liée à l'habitude de l'usage d'un ancien système - peut avoir un effet négatif, voire accidentogène, dans le cas où la mise en œuvre des modes opératoire précédents dans certains contextes engendre un risque avec la nouvelle interface. Besnard et Cacitti (2005) parlent à ce propos de transferts négatifs liés aux évolutions apportées à l'interface. Il en déduisent que, paradoxalement, il peut être souhaitable de faire en sorte d'inhiber, au niveau de la nouvelle interface, la possibilité pour un opérateur expérimenté, de pouvoir réappliquer les anciens modes d'interaction :

« The difficulty of unlearning previous knowledge suggests that whenever an interface change is performed and there is a change in the command-function mapping, the new interface should share as few features as possible with the former interface » (Besnard & Cacitti, 2005, p. 121).

4.2.2.3 Une alternative critique : privilégier l'apprentissage plutôt que la facilité d'utilisation

Des auteurs adoptent une position critique vis-à-vis des approches précédentes, en ce qu'ils considèrent la facilité d'utilisation comme une propriété peu souhaitable pour l'interface et l'interaction. Considérant, comme c'était le cas dans les précédents travaux, que l'utilisation et l'apprentissage constituent des objectifs et des mécanismes antagonistes, en compétition au cours de l'action, ces auteurs opposent deux choix du point de vue de la conception d'un outil. Le premier est de **permettre à l'utilisateur de réussir immédiatement la tâche** qu'il entreprend avec l'outil, avec la meilleure performance possible. L'alternative est de **susciter des activités de compréhension et de résolution de problèmes** qui, si elles ralentissent l'utilisateur momentanément, peuvent se traduire par un apprentissage plus durable et profond (Draper, 1998 ; Wickens, 1992). Draper (1998) élichte ainsi cette opposition :

« *maximize learning or maximize getting work done: are we trying to get users to succeed at their immediate tasks, or to learn the maximum ? If the former, then we generally want to provide every bit of information they need, removing the motivation for learning, while if the latter then we want to set them puzzles that may slow them up but will result in greater retention* ».

Ainsi, les interfaces conçues devraient avoir une moindre facilité d'utilisation, dans le dessein de maximiser l'apprentissage. Les arguments sont les suivants (voir par exemple Wickens, 1992). Lorsque l'utilisateur accède aux informations sur le système qu'il contrôle au travers d'une interface graphique, cela réduit son effort. Le fait de minimiser cet effort pourrait induire, sur le long terme, une compréhension moindre du fonctionnement des processus contrôlés via cette interface, ainsi qu'une mémorisation plus faible. De surcroît, la fourniture d'interfaces graphiques simples à traiter pourrait favoriser la tendance des opérateurs à développer une activité de traitement superficielle des informations affichées. Inversement, si les informations ne sont pas directement ou complètement disponibles, un effort plus important est nécessaire

de la part de l'opérateur pour inférer et construire les relations sous-jacentes, aboutissant au développement d'une connaissance plus profonde. Dit autrement, il s'agit d'opposer, d'un côté, la simplicité d'utilisation qui ne générerait pas d'apprentissage chez l'utilisateur - ou favoriserait un apprentissage superficiel restreint aux seules données présentées par l'interface - et, de l'autre côté, l'effort cognitif engendré par une interface incomplète qui favorise sur le long terme un apprentissage plus profond du système - parce que constituant la condition requise de l'utilisation.

4.2.3 L'utilisation : une activité produisant de l'apprentissage et du développement

Une troisième perspective de travaux aborde **l'apprentissage sous l'angle du produit de l'utilisation**. Dans cette voie, les auteurs militent pour anticiper voire exploiter l'apprentissage inhérent à l'utilisation (Carroll, 1990 ; Soloway et al., 1994 ; Vicente, 2002). Le critère de l'apprenabilité n'est pas alors principal, dans la mesure où l'objectif affiché est souvent plus large qu'apprendre l'utilisation de l'outil. Il s'agit plutôt de faciliter l'acquisition de compétences sur la tâche dans laquelle l'utilisation de l'outil prend place. Certaines acceptions de l'apprenabilité semblent toutefois faire référence à cette perspective, comme par exemple celle proposée par Brangier et Barcenilla (2003) pour qui l'apprenabilité se réfère à la « consolidation plus ou moins stable » des connaissances en mémoire résultant des apprentissages.

Plusieurs façons d'instancier ce lien sont identifiables dans la littérature. Le **respect de critères et de propriétés ergonomiques réputés faciliter l'apprentissage**, la mémorisation, le rappel, le transfert, etc. constituent ainsi une première approche. Il existe en effet une importante littérature expérimentale en psychologie et en ergonomie concernant les facteurs affectant les performances au niveau de ces différents indicateurs. Fondés sur ces résultats expérimentaux ou sur les opinions d'experts, les principes ergonomiques évoqués concernent par exemple (a) la diminution de la charge informationnelle, (b) la mise en forme des contenus présentés de façon à faciliter le traitement et la mémorisation de cette information ou des séquences d'action nécessaires à la réalisation d'une tâche (c) le guidage explicite au niveau de l'interface, etc. On trouve par exemple une référence à l'apprentissage dans plusieurs des « critères ergonomiques » (Bastien & Scapin, 1993). Ainsi, le critère d'homogénéité-cohérence « se réfère à la façon avec laquelle les choix de conception de l'interface sont conservés dans des contextes identiques, et sont différents pour des contextes différents (...) [le respect de ce critère fait que] le système est d'avantage prévisible et les apprentissages plus généralisables » (p 29).

D'autres approches mettent en avant l'idée que l'outil, par sa conception même, puisse constituer un instrument pour développer les compétences des opérateurs sur leur domaine de travail.

4.2.3.1 Faciliter l'apprentissage en favorisant l'exploration et la mise en œuvre d'une stratégie par essais et erreurs

Une première approche consiste à faire reposer l'apprentissage des procédures d'utilisation d'un outil informatique sur la mise en œuvre d'une activité d'exploration et par essais et erreurs. En d'autres termes, il s'agit de faire en sorte que les procédures d'utilisation soient aisées à décomposer spontanément en étapes, et qu'elles puissent être facilement déduites par la mise en œuvre d'une activité exploratoire (Wharton, Rieman, Lewis, & Polson, 1994). L'idée est de vérifier que l'apprentissage puisse se faire aisément par l'exploration des actions possibles, à chaque pas de la procédure d'utilisation (par ex. voir les recommandations dans Polson & Lewis, 1990).

Il existe un débat sur l'efficacité réelle de cette approche sur la base du constat récurrent des difficultés des utilisateurs à améliorer leur mode d'utilisation des outils informatiques malgré le fait qu'ils les utilisent quotidiennement. J'apporte quelques éléments empiriques sur ce sujet dans la partie suivante de ce chapitre (cf. 4.4). Des arguments théoriques sont aussi avancés : les connaissances préalables de l'utilisateur sur sa tâche et celles accessibles au travers de l'outil seraient insuffisantes pour construire un mode opératoire efficace (par ex. Bhavnani & John, 2000), ou encore selon les principes d'économie cognitive, les utilisateurs privilégieraient un comportement fondé sur le déroulement d'une connaissance antérieure plutôt que la création d'une nouvelle connaissance plus adaptée et la mise à l'écart de l'ancienne (par ex. Gray, 2000).

4.2.3.2 Faciliter l'apprentissage par la fourniture d'un environnement documenté minimaliste

Pour Carroll (1990), les utilisateurs lorsqu'ils sont confrontés à une nouvelle tâche et/ou un nouvel outil sont des apprenants actifs (« active learner ») dans le sens où ils privilégient **l'apprentissage par l'action et l'exploitation des opportunités et des réponses offertes par le dispositif au cours de l'utilisation**. Plusieurs dimensions du comportement caractériseraient cette approche de la prise en main des logiciels et autres dispositifs interactifs numériques :

- les utilisateurs ne commencent pas par apprendre et mémoriser les commandes avant de s'engager dans l'utilisation de l'outil et la réalisation d'une tâche ;
- les utilisateurs développent et poursuivent leurs propres buts à partir des connaissances dont ils disposent, construisant un chemin dans l'exploration qui leur est propre ;
- les utilisateurs recherchent peu ni ne suivent les prescriptions de la documentation, mais exploitent plutôt l'information disponible de façon opportuniste ;
- les utilisateurs cherchent à comprendre quand ils rencontrent un problème, et retiennent certaines connaissances de ces épisodes.

Le cadre du « minimalisme » ("minimalism" : Anson et al., 1998 ; Carroll, 1990 ; Rosson & Carroll, 2005) propose de favoriser cette approche de l'apprentissage, de l'anticiper lors de la conception pour pouvoir l'assister. Quatre principes de bases ont été proposés (par ex. Draper, 1998) :

- adopter une **démarche centrée sur l'utilisateur pour la conception de la documentation** en parallèle, voire simultanément au processus de développement du logiciel lui-même ; il s'agit d'une conception itérative s'appuyant sur les méthodes pour l'utilisabilité appliquées à la documentation de prise en main du logiciel, incluant notamment des tests avec la participation de « vrais » utilisateurs ;
- **organiser le contenu de la documentation à partir des objectifs et des tâches du monde « réel »**, choisis pour être réalisables par un primo-utilisateur, plutôt que sous la forme d'exercices artificiels introduisant progressivement des nouveaux objectifs et des difficultés ;
- **restreindre le contenu de la documentation aux seules informations pertinentes pour l'action**, c'est-à-dire sélectionner (a) l'information nécessaire pour agir, mais non disponible par ailleurs, (b) en tenant compte des connaissances préalables de l'utilisateur pour en minimiser la quantité, (c) en tenant compte également de l'information disponible dans l'environnement, ou de celle acquise lors d'étapes précédentes ;
- **adapter la forme et la structure de la documentation** de telle sorte qu'elle puisse être utilisée au fur et à mesure de la tâche et de l'interaction avec le logiciel (et non comme un livre présentant un exposé), en considérant la documentation comme un support « étendant » l'écran plutôt que comme sa réPLICATION ou sa substitution.

Rosson (2005) ajoute d'autres principes parmi lesquels :

- **laisser l'utilisateur s'appuyer sur sa capacité à raisonner et à improviser**, en l'obligeant à faire des inférences et en lui suggérant des astuces ;
- **favoriser l'exploitation des connaissances générales préalables** des utilisateurs au moyen de métaphores et d'analogies, de façon à maximiser les possibilités de transfert d'apprentissage ;
- **limiter les erreurs « nuisibles »**, par ex. une erreur lors de la frappe de l'adresse d'un site Web, **mais exploiter les erreurs offrant une opportunité d'apprendre** au fur et à mesure des essais au cours de l'exploration ; la conception doit anticiper et tenir compte de ces opportunités, de façon à fournir à l'utilisateur les rétroactions adéquates pour les identifier, les comprendre et les récupérer (par ex. messages d'erreurs contextuels de guidage, aide au diagnostic).

Draper (1998) rapporte que de nombreuses évaluations ont montré l'intérêt et la meilleure efficacité des documents pour l'apprentissage et pour la prise en main du logiciel, par comparaison avec les approches plus traditionnelles de la rédaction des manuels utilisateurs. Initialement focalisé sur la rédaction des manuels et des aides à l'apprentissage, le cadre minimaliste va plus loin de notre point de vue. En soulignant que l'objet de la conception de l'interaction est le système logiciel-documentation/manuel/situation d'utilisation et non le seul artefact logiciel, il en résulte que la prise en compte des caractéristiques de ce mode d'apprentissage par l'action détermine aussi les caractéristiques de l'interface du logiciel. Des études récentes suggèrent en effet que loin de s'appliquer à la seule documentation, le cadre minimaliste pourrait s'appliquer aussi aux caractéristiques du logiciel (par ex. Rosson & Carroll, 2005).

4.2.3.3 Susciter l'apprentissage et favoriser le développement des compétences par la conception d'interfaces écologiques

L'ingénierie cognitive des interfaces écologiques (EID-Ecological Interface Design, voir par ex. Hajdukiewicz & Vicente, 2002 ; Vicente, 1999) est un autre cadre soulignant explicitement la vocation de l'interface à **faciliter l'utilisation en même temps que l'apprentissage de l'opérateur**, afin que ce dernier puisse faire face aux situations non prévues et/ou nouvelles pour lui - ce qui est généralement le cas dans les systèmes tant soit peu complexes et ouverts. L'idée centrale est de rendre apparent pour l'utilisateur le fonctionnement du système et du processus qu'il contrôle par le biais des informations proposées au niveau de l'interface (voir par ex. Rasmussen, 1983 ; Vicente & Rasmussen, 1990). L'approche proposée vise en effet deux objectifs complémentaires (Hajdukiewicz & Vicente, 2002 ; Jamieson & Vicente, 2001) :

- offrir aux opérateurs la possibilité de gérer les contraintes d'un domaine de travail complexe (par ex. la conduite de processus chimique) en s'appuyant autant que faire ce peut sur leurs habiletés perceptivo-motrices ;
- assister, dans le même temps, les activités de résolution de problèmes (cognitivement plus coûteuses) requises par les contingences inattendues de toute nouvelle situation, afin de revenir à une situation nominale (Christoffersen, Hunter, & Vicente, 1998).

Aggregation - Decomposition			
	Whole System (DURESS)	Subsystems (Reservoir)	Components
Physical - Functional	Functional Purpose	Outputs to Environment	
	Abstract Function	Mass/Energy Topology	
	Generalized Function	Liquid Flow & Heat Transfer	Liquid Flow & Heat Transfer
	Physical Function		Component States
	Physical Form		Appearance & Location

Figure 13. Tableau croisant la hiérarchie d'abstraction et la hiérarchie de décomposition pour formaliser les différents niveaux de description de l'information dans le domaine de travail (Bisantz & Vicente, 1994) illustré dans le cas du simulateur DURESS (DUal REservoir System Simulation).

La démarche préconisée comprend deux étapes. La première consiste à **décrire l'information caractérisant le système contrôlé à différents niveaux d'abstraction et de décomposition** (Figure 13). La hiérarchie d'abstraction décrit le même système à plusieurs niveaux d'abstraction (Rasmussen, 1983 ; Vicente & Rasmussen, 1990) : le niveau le plus abstrait correspond à la vue fonctionnelle où sont décrites les fonctions globales pour lesquelles le système a été conçu. En bas de la hiérarchie, le niveau physique décrit les composants du système en termes d'état, de localisation, et d'apparence physique. Chaque niveau de la hiérarchie est lié au niveau sous-jacent et au niveau super-ordonné par une relation de type fins-moyens (means-ends). La hiérarchie de décomposition décrit quant à elle le système global jusqu'au niveau de ses composants. Cette étape nécessite un travail important en relation avec les spécialistes du domaine. Sur le plan théorique, cette formalisation constitue une tentative d'approche systématique de la modélisation des propriétés de l'environnement en regard de l'activité de l'opérateur interagissant avec un système complexe (Vicente, 2000 ; Vicente & Wang, 1998). Une fois le modèle établi, la seconde étape consiste à exploiter l'information ainsi hiérarchisée pour concevoir l'interface de contrôle de l'opérateur. Spécifiquement, l'approche préconise que **les relations abstraites identifiées et les contraintes associées doivent être « réifiées » au niveau de l'interface selon un format graphique**, afin que la sélection et le traitement soient simples et efficaces au niveau perceptif. Simultanément, **l'opérateur doit pouvoir agir directement sur cette représentation selon la métaphore de la manipulation directe**. L'idée est ainsi de mettre à profit les capacités humaines associant la perception à l'action pour développer une représentation fidèle et transparente de caractéristiques fonctionnelles et physiques du domaine de travail. Une proposition d'extension de cette approche dans le domaine de la réalité virtuelle a été faite récemment (Stoffregen, Bardy, & Mantel, 2006).

Cette approche a été évaluée positivement à la fois dans des situations de laboratoire, à travers l'exploitation de micro-mondes, et dans des contextes industriels. Des travaux (par ex. Christoffersen et al., 1998) montrent **l'effet facilitateur de l'interface écologique, d'une part au niveau de l'utilisation**

(mesurée par la performance) et, d'autre part, au niveau de l'apprentissage profond qui en résulte (mesuré par l'évolution de la compréhension du processus contrôlé, les erreurs et l'évolution des modes opératoires sur un laps de temps suffisamment long). Les interfaces ainsi conçues sont meilleures, par comparaison avec des interfaces traditionnelles, en particulier pour ce qui est de la performance dans les situations dégradées nouvelles pour l'opérateur (pour une revue, voir Vicente, 2002). Ces travaux mettent aussi en évidence que les propriétés de l'interface ne sont pas les seuls facteurs impliqués dans la performance. Ainsi **les différences interindividuelles peuvent affecter la performance d'apprentissage**, telles par exemple le style cognitif de l'opérateur utilisant le dispositif (Torenvliet, Jamieson, & Vicente, 2000) et son niveau de formation (Torenvliet et al., 2000). **L'approche adoptée par le sujet a également un rôle dans l'efficacité de l'apprentissage** (Christoffersen et al., 1998). Ainsi une approche superficielle de l'apprentissage (tendance à peu réfléchir sur le système et à favoriser un mode d'action basé sur les rétroactions offertes par l'interface), du fait d'une faible motivation par exemple, peut mener à une dépendance de la performance à la perception de l'affichage et concomitamment au développement d'une compréhension peu profonde du système contrôlé. Les performances sont alors équivalentes à celles qui sont observées dans le cas d'une interface traditionnelle. Inversement, les sujets qui privilégient la compréhension du processus en termes de buts et de fonctions et qui exploitent l'information de l'interface dans cette direction au fur et à mesure des essais, exhibent de meilleures performances, notamment, dans les situations de défaillance où un diagnostic est nécessaire. Enfin, **le type d'instruction donné semble aussi affecter l'exploitation optimale des informations affichées selon le principe des interfaces écologiques**. Ainsi, lorsque les sujets sont invités à expliquer leurs actions et leur raisonnement à haute voix, ils s'avèrent significativement meilleurs au bout d'un mois d'utilisation et d'essais quotidiens, comparativement aux autres groupes ayant seulement la pratique, ou la pratique associée au visionnage du rejet de leur essais (Howie & Vicente, 1998).

4.2.3.4 Adapter le logiciel au développement de l'utilisateur-apprenant

La conception centrée sur l'apprenant (« learner centred-design ») est née initialement d'une critique forte de la conception centrée sur les utilisateurs (cf. Soloway et al., 1994). Les deux citations suivantes fournissent une illustration de l'idée défendue :

« Professionals are students who happen to learn outside of the classroom » (Soloway et al., 1994).

« As lower level interface issues have become easier, it seems vital to extend [the approach] to instructing and supporting users in learning « higher », job-related aspects of the task the machine is being used for » (Draper, 1998).

Cette approche met en avant quelques propriétés fondamentales que devrait posséder tout logiciel destiné à favoriser l'apprentissage au travers de l'utilisation. L'une de ces propriétés fondamentales est la notion **d'étayage** (« scaffolding ») associée à la notion de **disparition progressive** (« fading »). L'étayage consiste concrètement à fournir - de différentes façons appropriées - un soutien temporaire aux besoins de l'apprenant vis-à-vis de la tâche, de l'interface et des outils, par le truchement du logiciel. Différents types d'étayage sont distingués (Jackson, Krajcik, & Soloway, 1998) :

- **l'étayage de soutien** (« supportive scaffolding ») concerne l'offre de suggestions, de conseils et d'aides centrés sur la réalisation de la tâche au cours de son déroulement ; il est couramment distingué le guidage (« guiding ») par ex. messages, instructions ou formes de dialogue structuré), l'accompagnement (« coaching », par ex. suggestion de stratégies, aide), la modélisation (« modelling », par ex. illustration, proposition d'exemples à imiter). Ces deux derniers types sont souvent déclenchés à l'initiative de l'utilisateur ;
- **l'étayage réflexif** (« reflective scaffolding ») concerne les moyens visant à faire réfléchir l'apprenant sur la tâche, par ex. l'amener à expliciter les buts qu'il poursuit et comment il planifie de les atteindre, expliciter comment il évalue sa progression dans la réalisation de la tâche, expliciter les conséquences ou l'état qu'il anticipe après une action.
- **l'étayage intrinsèque** (« intrinsic scaffolding »), à la différence des deux précédents, concerne les modifications apportées à la tâche elle-même, de plusieurs façons possibles : réduction de sa complexité et focalisation de l'attention sur les éléments significatifs, affichage de représentations conceptuelles ou d'abstractions pour la tâche, etc.

Le but ultime de l'étayage est toutefois de s'effacer. Il y a donc nécessité de concevoir des mécanismes autorisant sa disparition progressive, de sorte à laisser progressivement à l'apprenant l'autonomie de l'action une fois acquises les compétences nécessaires.

4.2.4 Conclusion

Les arguments théoriques précédents et les données empiriques qui les accompagnent font relativiser la pertinence d'une opposition, par exclusion mutuelle, entre l'utilisation et l'apprentissage. Tout d'abord, la question de favoriser l'utilisation ou l'apprentissage ne se résout pas de façon binaire : une charge trop importante est susceptible de générer à la fois une absence d'utilisation pour la majeure partie des utilisateurs potentiels, et à la fois une absence ou, pour le moins, des difficultés d'apprentissage pour ceux qui l'utilisent (par ex. Sweller, 1994). Inversement, la simplification et la bonne qualité d'utilisabilité d'une interface ne peuvent remplacer l'expertise de l'opérateur, car comme le souligne Bannon (1992) :

« a consequence of trying to make such a system is that an incredible amount of "intelligence" must go into its initial design and maintenance. Taken to the extreme, we have the prospect of artificially intelligent systems operated by morons, an absurd scenario. »

De même, l'analyse des situations de travail et d'usage de dispositifs montre que les activités humaines sont une combinaison d'apprentissage (« learning ») et d'action (« doing »), s'appuyant sur un mélange de mémoire interne et d'information prélevée avec plus ou moins d'opportunisme dans l'environnement externe. La reconnaissance de cette double composante d'utilisation (ou d'action) et d'apprentissage dans l'activité humaine en lien avec des interfaces informatisées s'avère aujourd'hui peu présente dans les approches ou les cadres théoriques en ergonomie des logiciels et des nouvelles technologies. J'ai néanmoins mentionné dans les sections précédentes quelques approches qui militent pour réintégrer, dans les préoccupations de la conception, les opportunités d'apprentissage et de développement offertes par l'outil et son environnement, ainsi que la capacité de l'utilisateur à se développer au fur et à mesure des interactions avec l'outil.

4.3 Apprentissage et utilisation : bilan des études en ergonomie des technologies émergentes (synthèse)

L'examen de la littérature empirique sur les nouvelles technologies ou en cours d'émergence fait apparaître majoritairement une séparation entre d'un côté des études sur l'utilisation et de l'autre des études sur l'apprentissage.

Les premières s'attachent essentiellement à évaluer la performance d'utilisation et à améliorer l'utilisabilité, avec d'ailleurs souvent en filigrane l'idée que la technologie ou la solution proposées va apporter une amélioration significative relativement à l'existant. La dimension d'apprentissage y est souvent absente, tant est forte la tendance à vouloir montrer la supériorité des performances et l'adhésion des utilisateurs. Il y a peu d'études longitudinales. Cette vision de la performance d'utilisation est statique, intemporelle et presuppose que l'objectif de l'utilisateur est d'atteindre le plus rapidement possible le but fixé par la tâche. Ces deux points posent problème selon moi, parce qu'occultant du débat une partie de la question du rapport entre utilisation et apprentissage, avec au mieux une référence à l'apprenabilité. Les secondes études s'intéressent à divers contextes, mécanismes et facteurs susceptibles d'influencer la performance d'apprentissage ; cette dernière est souvent mesurée par l'évolution des scores dans une tâche ou par des scores de rappels. L'analyse systématique des difficultés et des connaissances élaborées au cours de l'utilisation y est plus rarement rapportée.

Cette séparation fait par ailleurs écho à une distinction – parfois tacite – faites en ergonomie informatique et plus largement dans le champ de la conception, selon que l'activité visée par le système à concevoir est l'utilisation ou l'apprentissage. Lorsqu'il s'agit d'utilisation, la conception se fonde sur une tâche idéale – en général issue d'experts – pour définir l'organisation des interfaces et interactions. Les situations d'études exploitées abordent alors peu les aspects d'apprentissage ou de développement individuel, car ces situations sont le plus souvent orientées sur l'identification des défaillances et sur la production de solutions. Les erreurs y sont souvent envisagées comme des événements indésirables à éviter. Lorsqu'il s'agit d'apprentissage, inversement, l'erreur n'est plus forcément à éviter et peut même prendre un statut privilégié selon la formule consacrée « on apprend de ses erreurs, pas de ses succès ». Encore qu'il faille relativiser suivant le contexte et les cadres de références : même dans le contexte d'un apprentissage, certaines erreurs peuvent avoir le statut d'évènements à éviter.

Une deuxième distinction entre ces études concerne le type de dispositif impliqué dans les études. Seule une faible part des travaux sur l'utilisation et l'apprentissage concerne des logiciels spécifiquement dédiés à l'entreprise dans le contexte de projets d'informatisation. Ainsi, le plus grand nombre d'études portent sur des logiciels et dispositifs grand public, que ceux-ci soit utilisés dans un contexte professionnel ou de loisir.

4.3.1 Les études portant sur les progiciels et l'informatisation au travail

Depuis les travaux sur l'automatisation dans les années 1980-1990 (par ex. Bainbridge, 1987), il semble y avoir peu de travaux publiés sur l'apprentissage et l'utilisation de logiciels orientés métiers par des non-informaticiens dans un contexte réel. Les quelques études identifiées (voir de la Garza & Stocker, 2003 ; Gaudart, 2000 ; Laffererie, Langa, & Négroni, 1999 ; Santos & Lacomblez, 2006) sont focalisées sur l'appropriation effective des dispositifs et l'impact de l'informatisation, menées à partir d'observations et d'analyses sur le terrain et s'inscrivant dans un temps généralement long. Ces recherches mettent peu l'accent sur des défauts précis en lien avec l'utilisabilité ou l'apprentissage, à quelques exceptions près.

Au-delà des points spécifiques à chaque étude, plusieurs constats sont récurrents. Ces études insistent souvent sur l'impact des choix de conception quant à la possibilité pour les utilisateurs de réinvestir ou non leur expertise et leur expérience pour apprendre et utiliser le nouveau système. La compatibilité entre l'outil et les caractéristiques cognitives et organisationnelles de l'activité concernée est également pointée comme centrale dans l'évaluation de l'utilisation par les utilisateurs, en termes d'utilisabilité et plus encore d'utilité des logiciels considérés. Dans le contexte d'un usage professionnel important, les défauts d'utilisabilité génériques, c'est-à-dire liés au non respect de critères concernant l'interaction (par ex. défaut de guidage, densité informationnelle, etc.) semblent voir leur effet s'atténuer au fur et à mesure du temps, soit parce qu'il y a apprentissage, soit parce que des stratégies de prévention ou de compensation sont construites individuellement ou collectivement par les utilisateurs. Inversement, l'absence de certaines fonctions, perçues par les utilisateurs comme nécessaires ou utiles pour réaliser la tâche, constitue une difficulté qui perdure voire supplante dans le jugement les défauts d'utilisabilité des premières périodes (par ex. Gaudart, 2000).

Plusieurs de ces études illustrent également le fait, qu'au-delà du périmètre de l'apprentissage de l'interface et l'interaction, l'innovation technologique implique généralement d'importantes modifications des tâches tant sur le plan individuel que du collectif et plus globalement au niveau de l'organisation de l'entreprise. Ainsi, il peut y avoir allègement des tâches répétitives (par ex. saisie d'information) parallèlement à un accroissement des tâches à fortes exigences cognitives (par ex. planification et anticipation, gestion d'interférences ou d'interdépendances entre tâches réparties dans le temps et l'espace à l'échelle du processus de travail de l'entreprise). La question de l'utilisation et de l'apprentissage doit de ce fait être aussi examinée sous cet angle du changement impliqué concernant le métier : les tâches qui évoluent mais aussi les responsabilités, les risques induits par des logiciels de plus en plus inter-connectés où l'action de chaque acteur peut voir ses conséquences directement propagées dans l'ensemble du système de travail (Laffererie, Langa, & Négroni, 1999). Dans ce cas, maximiser la facilité d'utilisation peut d'ailleurs augmenter la dangerosité d'une application (Burkhardt & Sperandio, 2004).

4.3.2 Les études portant sur des logiciels et des dispositifs grand public

L'utilisation d'outils techniques automatisés ou de produits électroniques grands publics a été abordée dans diverses situations de terrain ou expérimentales portant sur : des automates bancaires (par ex. Mead & Fisk, 1998), des magnétoscopes (par ex. Gray, 2000), et plus généralement des outils techniques (par ex. Sperandio, de la Garza, Michel, Specht, & Uzan, 1998b ; Sperandio, de la Garza, Specht, Uzan, & Michel, 1998). Ces études mesurent l'effet de facteurs comme l'âge, les déficiences perceptives ou les caractéristiques de l'interface sur l'efficacité d'utilisation, ou bien, tentent d'éclairer les difficultés à même d'en restreindre l'accès à des populations spécifiques d'utilisateurs.

En situation professionnelle, l'apprentissage de logiciels « tout public » tels les outils de Bureautique par / au cours de leur utilisation, semble avoir été peu étudié, malgré un relatif regain d'intérêt depuis peu. On peut néanmoins citer quelques travaux sur l'apprentissage et/ou l'utilisation, réalisés avec une dominante expérimentale en laboratoire. Ceux-ci ont porté sur différents systèmes ou dispositifs : des traitements de textes (par ex. Ben-Ari, 1999 ; Charness, Kelley, Bosman, & Mottram, 2001 ; Czaja, Hammond, Blascovich, & Swede, 1989 ; Davis & Wiedenbeck, 1998 ; Rosson, 1984 ; Sander & Richard, 1997 ; Singley & Anderson, 1987-1988) ou autres outils de bureautique, par ex. MS PowerPoint (Pelletier, 2001), des logiciels de messagerie électronique (par ex. de Mul & van Oostendorp, 1996 ; Gwizdka & Chignell, 2004), des outils de navigation sur Internet (Burkhardt, Specht, & Sperandio, 1999 ; de la Garza & Burkhardt, 2001 ; de la Garza & Burkhardt, 2002 ; Debeugny & Burkhardt, 2003 ; Specht, Burkhardt, & De La Garza, 1999 ; Specht, Burkhardt, & Garza, 1999 ; Specht, Burkhardt, & Sperandio, 1999a, 1999b ; Specht, De La Garza, & Burkhardt, 1999), ou encore des documents électroniques (hypertexte, hypermédia) en vue de la recherche d'information et de l'apprentissage (par ex. Rouet & Tricot, 1995 ; Tricot & Bastien, 1996).

On trouve enfin de nombreux travaux adoptant une approche psycho-sociologique. Ceux-ci concernent en réalité peu l'activité et se fondent essentiellement sur des questionnaires administrés sur de grandes

populations. Les résultats portent essentiellement sur la fréquence rapportée d'usage, la perception de la technologie, la perception de son utilité et sur des facteurs individuels éventuellement corrélés, tel que par exemple le niveau d'anxiété exprimé vis-à-vis de la technologie (par ex. Zhang, 2005).

4.3.3 Quelques résultats généraux

4.3.3.1 L'apprentissage fondé sur l'utilisation et le bricolage apparaît incomplètement efficace

Sur le terrain, la notion d'apprenabilité renvoie plus directement à l'apprentissage effectif des dispositifs par les utilisateurs. Plusieurs auteurs constatent que l'apprentissage des outils de bureautique est majoritairement informel. Cet apprentissage passe essentiellement par une stratégie de "bricolage" (Ben-Ari, 1999 ; Melyani, 1996), c'est-à-dire un mélange d'improvisation, d'imagination, d'exploration et d'adaptation permanente basé sur une approche concrète, ce que les utilisateurs d'outils informatiques appellent aussi "le bidouillage". Les occasions d'apprentissage plus formalisées comme le recours aux ouvrages, les réunions, les stages de formation apparaissent à l'inverse très faiblement représentées.

De nombreux résultats suggèrent que ce mode d'apprentissage a une efficacité incomplète, des difficultés récurrentes et des incompréhension persistantes étant observées même auprès de personnes expérimentées en informatique, ou ayant une utilisation fréquente des logiciels considérés. Ainsi, même pour des utilisateurs ayant un usage quotidien, l'utilisation répétée associée au "bricolage" semble n'être ni suffisante ni efficace pour construire un modèle « viable » du fonctionnement interne du logiciel (Ben-Ari, 1999). Plusieurs raisons sont avancées dans la littérature, qu'il conviendrait d'analyser plus en profondeur :

- une utilisation par tâtonnement ne permet pas de construire ni d'améliorer une représentation efficace des règles et des paramètres de fonctionnement du logiciel (Ben-Ari, 1999) ;
- les stratégies optimales d'utilisation ne peuvent pas être reconstruites au moyen des seules connaissances sur la tâche (Bhavnani & John, 2000) ou des informations accessibles à partir de l'outil et de la documentation et la formation l'accompagnant ; il en découle une méconnaissance des fonctionnalités, des principaux intérêts et des stratégies d'optimisation spécifiques à l'informatique ;
- l'expérience précédente dans la tâche interfère négativement et de façon persistante avec le mode d'utilisation des nouveaux outils (Bhavnani & John, 2000) ;
- la facilité initiale d'utilisation semble supprimer toute velléité ultérieure à chercher à apprendre face à des difficultés non-triviales (Ben-Ari, 1999).

4.3.3.2 Les difficultés d'utilisation peuvent s'avérer bloquantes pour l'apprentissage

Les trois études présentées dans la partie suivante (cf. 4.4) montrent que les difficultés d'utilisation persistent avec le temps, y compris dans un contexte professionnel et lorsque l'utilisation est fréquente. Ce résultat peut être rapproché des conclusions d'une autre étude (Melyani, 1996), basée quant à elle sur des entretiens auprès d'utilisateurs réels en entreprise. Cette étude rapportait l'absence de différence entre utilisateurs informaticiens ou non-informaticiens du point de vue des problèmes et des difficultés rencontrées dans l'utilisation des outils de bureautique. La différence liée à l'expertise en informatique résidait pour l'essentiel dans une meilleure capacité à trouver des solutions aux problèmes rencontrés, bien plus que l'absence de rencontre de tels problèmes. Le constat des difficultés liées à des défauts dans la conception, tant pour l'utilisation que pour l'apprentissage, a également été fait en ce qui concerne des difficultés en termes d'organisation à l'intérieur des collectifs (par ex. Bhavnani & John, 2000 ; Gaudart, 2000).

Dans le cas de logiciels fonctionnellement plus complexes à utiliser, tels par exemple l'interface en ligne de l'ISI Web of Science, des travaux récents montrent que, même après une formation adaptée, les performances et la satisfaction des utilisateurs ne progressent pas toujours au cours des utilisations ultérieures, voire même diminuent (Ahmed, McKnight, & Oppenheim, 2005). Les difficultés d'utilisation peuvent constituer par conséquent un blocage pour l'apprentissage dans certaines conditions. Par exemple, la lisibilité des caractères à laquelle la population âgée est en moyenne plus sensible, pourrait ainsi contrecarrer l'utilisation et devenir dans certains cas une condition de l'apprentissage.

4.3.3.3 La formation à l'utilisation des nouvelles technologies n'est pas vue comme un enjeu, ou s'avère inadéquate

L'incomplète efficacité de l'apprentissage par l'utilisation ne semble malheureusement pas devoir être palliée par la formation, en partie parce que le besoin de formation aux nouvelles technologies est généralement sous-estimé. Plusieurs raisons pourraient expliquer ce constat. Parmi celles-ci, les outils informatiques actuels sont généralement perçus comme plus simples et intuitifs, ce qui limiterait la nécessité d'une formation. Dans le même temps, le développement et l'amélioration de documents d'aide à la prise en main, voire la multiplication des logiciels d'autoformation sont fréquemment avancés comme une alternative à la

formation « traditionnelle ». Enfin, l'alphabétisation aux technologies informatiques (« computer literacy ») des nouveaux arrivants dans la vie professionnelle évolue, l'informatique ayant largement investi la vie quotidienne, voire la formation scolaire puis la formation professionnelle initiale. Le seul cas où ce besoin de formation semble éventuellement reconnu concerne les fortes innovations technologiques et/ou organisationnelles, des actions de formation étant alors mises en place.

Il peut y avoir une inadéquation entre les besoins réels en termes de formation et la formation correspondante mise en place. Cette inadéquation peut se situer sur plusieurs plans relevés par de nombreux auteurs :

- l'approche mise en oeuvre au moment de l'analyse des besoins peut favoriser les besoins organisationnels au détriment du savoir et des compétences actuelles des opérateurs qui, pourtant, contribuent à son efficacité actuelle (Fournier, 2004) ;
- les objectifs pédagogiques définis recoupent peu ou pas les besoins effectifs liés à l'informatisation et à l'innovation technologique (Bhavnani & John, 2000 ; Bhavnani, Reif, & John, 2001 ; Fournier, 2004) ;
- le contenu ciblé par la formation se restreint souvent aux commandes et aux tâches les plus élémentaires, abordant peu ou pas les tâches réellement écologiques. Le constat est similaire dans de nombreuses études (par ex. Bhavnani & John, 2000 ; Santos & Lacomblez, 2006 ; Fournier, 2004).
- l'accès à la formation n'est pas toujours facilité dans les organisations (Bhavnani & John, 2000) ;
- il peut exister un décalage temporel important entre la formation et le moment de l'application ;
- il peut aussi exister un décalage technique important entre la formation et la situation d'utilisation : il n'est pas rare que le système effectivement exploité dans la formation diffère fortement du futur système, soit incomplètement fonctionnel le jour de la formation (par ex. Santos & Lacomblez, 2006) voire même soit inutilisable ;
- en termes de méthode et de ressources exploitées, les modes de la formation juste-à-temps et au poste de travail ne facilitent pas l'apprentissage ;
- la pertinence des scénarios de formation, des approches et le mode d'organisation de la formation sont également en jeu comme le suggère de nombreux auteurs (Fournier, 2004 ; Lacomblez, Santos, & Vasconcelos, 2004 ; Santos & Lacomblez, 2006).

Il en découle que l'apprentissage des utilisateurs peut s'avérer peu lié au bénéfice de la formation, malgré la conception et la réalisation d'actions de formations, restant majoritairement du domaine de l'apprentissage sur le tas. Ainsi dans l'étude de Santos et Lacomblez (2006), « si la plupart des travailleurs a fini par utiliser régulièrement le système de radiofréquence, cela ne fut pas le fruit de l'action de formation en question, mais bien celui de la nécessité imposée par le quotidien et de la mobilisation de l'expérience antérieure. Apprendre sur le tas, par essais et erreurs peut en outre finir par connoter négativement les compétences de l'opérateur, ou encore par dégoûter celui-ci de tout changement impliquant un nouvel apprentissage ».

4.3.4 Vers une considération des dimensions de l'apprentissage et du développement en lien avec l'utilisation

Qu'il soit étudié en laboratoire ou sur le terrain, le rapport entre utilisation et apprentissage renvoie à (au moins) deux axes d'investigation, qui peuvent d'ailleurs cohabiter en pratique : apprendre à utiliser vs. apprendre au travers de l'utilisation. Le premier axe s'intéresse à « **comment un sujet apprend à utiliser** », tandis que le second s'intéresse à « **ce qu'il est possible d'apprendre au travers de l'utilisation** ». Dans les deux cas, il y a une mise en relation entre l'utilisation d'un artefact et une connaissance qui en découle. Toutefois, dans le premier, le focus de l'apprentissage réside dans l'utilisation elle-même. Dans le second cas, le focus de l'apprentissage porte sur d'autres connaissances que celles décrivant l'utilisation de l'artefact, celui-ci ayant alors un statut de médiation vis-à-vis de l'apprentissage considéré.

4.3.4.1 Apprendre à utiliser par l'utilisation

Dans ce premier cas, on peut formaliser la relation entre utilisation et apprentissage de la façon suivante. L'activité développée par un utilisateur constitue un épisode spécifique d'utilisation U d'un artefact lui-même spécifique, dans une situation tout aussi spécifique. Cet épisode U se traduit par une performance d'utilisation réalisée R et par des connaissances K_U spécifiques sur l'utilisation découlant de cet épisode d'utilisation de l'artefact. Dans beaucoup d'études sur l'utilisabilité, on s'intéresse à la seule dimension de la performance réalisée R, qui plus est au cours d'un épisode (voire quelques épisodes au mieux) et moins aux connaissances mobilisées par la personne et aux interactions entretenues avec les propriétés de l'outil et les propriétés de la situation. Pourtant, sauf dans le rare cas d'un artefact dont le sujet aurait une utilisation unique, plusieurs itérations d'épisodes d'utilisation sont généralement réalisées. Au cours de ces itérations, des connaissances sont produites, éventuellement très spécifiques, qui vont venir modifier la situation d'utilisation du point de vue de la perception et des connaissances mobilisables par le sujet, y compris des

connaissances sur sa propre capacité à utiliser. Cette dynamique de construction peut avoir un effet facilitateur ou non, à l'échelle de l'épisode comme plus globalement à l'échelle de l'utilisation dans un répertoire de situations variées. D'ailleurs, c'est rarement la connaissance d'un artefact spécifique dans une situation également spécifique qui a un intérêt pour le sujet, mais plutôt l'élaboration d'une connaissance caractérisant l'utilisation d'une classe d'artefacts (plutôt que cet artefact particulier) dans des classes de situations (plutôt que dans cette situation particulière).

C'est pourquoi, plutôt que la seule mesure de la performance réalisée, il me semble fructueux pour l'ergonomie de viser à apprêhender cette **activité dynamique d'apprentissage par l'utilisation**, pour la comprendre d'une part, et pour concevoir des artefacts et des situations qui soient à même d'orienter favorablement une telle dynamique, d'autre part. Il en découle qu'il est souhaitable de ne pas restreindre le recueil des données aux seules mesures des réalisations produites au cours de l'activité d'utilisation. Deux autres objectifs parallèles de recueil sont également intéressants : d'une part, il s'agit de ce qui peut être observé en termes de construction des connaissances au cours et à propos de la situation observée et, d'autre part, il s'agit des interprétations qu'en fait le sujet. Si lors d'une première utilisation, le sujet dispose uniquement de ses connaissances propres et des ressources qu'il perçoit comme mobilisables dans son environnement, il dispose ensuite d'une expérience qui s'incrémente à chaque itération. L'évolution de cette expérience, comme la reconnaissance d'opportunités offertes par la situation, sont autant d'éléments qui peuvent conduire un sujet à modifier sa perspective sur la situation d'utilisation de l'artefact. Il y a donc une boucle de rétroaction vers la situation d'utilisation U à chaque itération, laquelle affecte à la fois le sujet, l'artefact et la situation. Enfin, un point non négligeable est l'objectif que se fixe le sujet en regard de l'artefact à utiliser, lequel peut renvoyer à au moins trois cas différents :

- l'utilisateur peut **rechercher la performance immédiate en regard de la tâche**, c'est-à-dire l'efficacité, la rapidité ou l'efficiency ;
- l'utilisateur peut avoir comme objectif non la réussite à la tâche mais **l'apprentissage de l'utilisation**, c'est-à-dire l'exploration du dispositif et de ses possibilités, l'essai d'une procédure alternative, etc. ;
- l'utilisateur peut enfin viser **la compréhension des règles de fonctionnement de l'artefact**, c'est-à-dire la construction d'une représentation efficace du comportement du dispositif, de ses limites et de ses conditions de fonctionnement.

Ces trois cas – et sauf pour des situations extrêmement restreintes – conduisent à des approches de la situation d'utilisation probablement assez différentes, seule la première étant généralement retenue dans les situations et les modèles d'analyse exploités dans les études expérimentales sur l'utilisabilité.

4.3.4.2 Apprendre ou comprendre au travers de l'utilisation

Ce second cas représente les situations où le focus porte sur l'apprentissage de connaissances autres que celles concernant l'utilisation de l'artefact en lui-même : par exemple les propriétés de l'objet manipulé par l'artefact, les concepts ou les notions susceptibles d'être appréhendés au travers de l'utilisation du dispositif ou de la structure d'information considérés. En d'autres termes, il s'agit d'étudier en quoi l'utilisation préconisée d'un artefact peut fournir (ou non) un moyen d'apprendre une connaissance K_a distincte des connaissances K_u nécessaires pour utiliser. Dans ce deuxième axe, apprentissage et utilisation ne renvoient pas au même objet, l'objet de l'apprentissage étant distinct de l'artefact utilisé qui constitue alors un instrument de connaissance vis-à-vis de l'objet de connaissance ciblé. L'artefact a alors une fonction de médiateur entre le sujet et l'« objet » à connaître (Rabardel, 1995). Il en découle que pour construire une connaissance à propos de cet objet, l'utilisation de l'artefact constitue un prérequis si l'objet ne peut pas être exploré directement, et qu'en même temps elle contraint ce qu'il est possible de faire et d'apprendre.

Cela me conduit à souligner l'intérêt d'examiner l'efficacité de telles médiations dans le contexte des technologies émergentes, ainsi que le rôle des contraintes liant l'artefact et l'objet dans l'élaboration des connaissances par les utilisateurs au cours des différents épisodes d'utilisation.

4.4 Utiliser comme mode d'apprentissage de l'utilisation des outils issus des nouvelles technologies (Contributions empiriques)

Cette partie aborde le versant empirique de ce questionnement concernant les liens entre l'utilisation et l'apprentissage de l'utilisation au travers de quelques-unes des recherches que j'ai menées ou encadrées. La première s'intéresse à l'apprentissage et aux stratégies mises en œuvre au cours de l'utilisation d'un logiciel de présentation assistée par ordinateur dans un environnement professionnel. Les deux suivantes traitent de l'apprentissage et de l'utilisation de la navigation sur Internet.

4.4.1 Apprentissage et utilisation du logiciel MS Power Point dans un environnement professionnel

Dans cette étude (Pelletier, 2001) menée en entreprise sous ma direction lors d'un travail de recherche pour le master en Psychologie, il s'est agit notamment d'étudier comment les assistantes apprennent et utilisent le logiciel de bureautique MS Power Point, dans le but de créer des outils pour faciliter le partage d'expérience.

Méthode. 10 assistantes ont été réparties en deux groupes sur une base multicritères à partir d'un questionnaire envoyé à l'ensemble des 55 assistantes de l'entreprise et auquel 45 (i.e. 82%) ont répondu. Le premier groupe est constitué d'assistantes utilisant peu ou pas PowerPoint (utilisation occasionnelle) et évaluant cette utilisation comme peu « bonne ». Le second groupe utilise très souvent le logiciel et estime sa pratique assez bonne voire excellente (utilisation fréquente). Trois tâches d'une difficulté croissante étaient proposées successivement aux sujets. Ces tâches avaient été construites sur la base d'une pré-étude où plusieurs assistantes (n'ayant pas participé par la suite) ont eu à évaluer la facilité d'emploi de 36 des principales fonctions de MS Power Point, incluant le masque, les commandes d'animations etc. Les passations se sont déroulés de façon individuelle sur leur lieu de travail. Les enregistrements audio et vidéo (capture de l'écran) de la passation ont ensuite été analysés sur la base de la méthode des protocoles verbaux, en relation avec les actions et le temps mis pour réaliser chacune des tâches.

Les résultats ont montré une performance supérieure dans l'utilisation, liée à l'expérience et à la fréquence d'utilisation. En effet, les assistantes expérimentées atteignent du premier coup, dans un plus grand nombre de cas, les différents objectifs balisant la réalisation des tâches (93% vs. 68%). Elles sont significativement plus rapides que les assistantes peu expérimentées. Ces dernières mettent 21% de temps en plus, font plus de demandes d'aides et rencontrent un nombre systématiquement plus grand de difficultés ($m=27$ contre $m=21$ pour les plus expérimentées).

La variable expérience se traduit pour les assistantes expérimentées par une **meilleure compréhension et une meilleure anticipation lors des actions** sur le logiciel. Ainsi, les assistantes ayant peu d'expérience se caractérisent par un nombre beaucoup plus élevé de résultats qui les surprennent, c'est-à-dire qu'elles n'avaient pas anticipées (23% contre 3% seulement pour les assistantes expérimentées). Elles expriment une compréhension de leurs actions et de leur conséquence dans une proportion plus faible (64% vs. 92%). Enfin, l'analyse des premières actions mises en œuvre pour atteindre chaque but montre que celles-ci sont pertinentes seulement dans la moitié des cas (54% vs. 45% d'actions non pertinentes) chez les assistantes occasionnelles, alors que celles mises en œuvre par les assistantes expérimentées le sont majoritairement (81% vs. 19% d'actions non pertinentes).

L'analyse des stratégies montre enfin que les deux groupes diffèrent principalement sur deux aspects : **la stratégie dominante** et le **recours à l'analogie**. Chez les assistantes occasionnelles, en effet, l'utilisation du logiciel au cours de la réalisation des tâches est caractérisée par la dominance d'une stratégie « faible » (i.e. 51%), correspondant à une lecture globalement indépendante du contenu informationnel, cette stratégie étant appliquée de façon systématique. Par exemple, l'assistante examine le contenu de tous les onglets en commençant par le haut et la gauche, ou encore elle verbalise qu'elle explore « pour voir ce qu'il y a ». Inversement, les assistantes expérimentées privilègient une stratégie « opportuniste » (i.e. 77%) que nous avons définie comme correspondant à une lecture ou à des actions sélectives mis explicitement en relation avec le but courant poursuivi par le sujet. Les assistantes occasionnelles, comme celles plus expérimentées, s'appuient également sur l'établissement d'analogies (respectivement 17% et 12% des cas) pour atteindre les objectifs de la tâche. Cette stratégie consiste à faire une référence explicite à des éléments de connaissance provenant d'un autre objet ou domaine de savoir. **Les analogies les plus courantes, intra-domaines**, concernent le logiciel de traitement de texte MS Word, mieux connu ou plus utilisé. L'analyse qualitative montre que l'établissement d'une analogie peut engendrer des difficultés supplémentaires dans l'utilisation et la compréhension, du fait des différences conceptuelles entre les applications. Par exemple, dans la tâche nécessitant l'insertion des numéros de pages dans le diaporama, les assistantes peu expérimentées tentent d'utiliser la commande « entête/bas de page » par analogie avec la commande éponyme du traitement de texte, alors que celle-ci concerne le document associé au diaporama et non le diaporama lui-même (la commande correcte correspond au « masque de diapositive »).

Il est aussi montré que **les difficultés de compréhension, les erreurs et les difficultés subsistent** chez toutes les assistantes, même s'il y en a moins chez les utilisatrices fréquentes et expérimentées. Ces dernières exhibent en effet aussi des épisodes d'incompréhension ou d'interprétation incorrectes vis-à-vis de la logique de fonctionnement du logiciel.

4.4.2 Apprentissage et utilisation d'Internet par les seniors

Cette étude a porté sur certains facteurs associés aux difficultés d'utilisation et à l'apprentissage d'Internet, comme l'âge, l'expérience préalable et, les caractéristiques de l'outil en termes d'utilisabilité et d'accessibilité (Burkhardt, Specht et al., 1999 ; de la Garza & Burkhardt, 2001, 2002 ; de La Garza, Burkhardt, & Specht, 1999 ; Specht, Burkhardt, & Sperandio, 1999b). Faisant suite à une recherche sur l'utilisation des objets techniques en général (de la Garza, Sperandio, & Specht, 1999 ; Sperandio, de la Garza, Michel, Specht, & Uzan, 1998a), ce travail mené entre 1996 et 2000 s'insérait dans un programme de recherche financé par la MIRE-CNAV en vue d'évaluer, et de minorer le cas échéant, les risques potentiels des seniors notamment en termes d'exclusion « technologique ». Il a impliqué plusieurs chercheurs du Laboratoire d'Ergonomie Informatique ainsi que de nombreux étudiants.

La possibilité d'observer des situations naturelles d'apprentissage et d'utilisation de la navigation sur le web reste en effet problématique du fait de la récence du phénomène Internet chez les aînés. De plus, certaines caractéristiques de la population âgée renforcent cette difficulté d'accès. Nous sommes partis de l'observation de situations « naturelles » dans lesquelles les aînés viennent apprendre ou utilisent Internet (par ex. à domicile avec les proches, ou dans le cadre de clubs spécialisés), pour construire une situation d'expérimentation quasi-écologique. La situation proposée consistait en une situation individuelle de découverte plutôt autonome, au travers de tâches préalablement construites, où le recours à un tiers (l'expérimentateur) pour l'assistance est ponctuel, généralement à l'initiative de la personne. Deux sites webs contrastés du point de vue de l'utilisabilité et de la destination étaient utilisés.

Méthode. 30 personnes ont participé à l'étude, sur la base du volontariat et en réponse à une campagne de recrutement diversifiée, auprès d'associations notamment. Il s'agit par conséquent d'aînés probablement parmi les plus motivés à vouloir apprendre à utiliser Internet, de profil généralement urbain, et habitant dans la région parisienne. Pour diverses raisons techniques, les données analysées ont porté uniquement sur 28 participants. Il y avait 17 personnes de la classe d'âge 58 à 69 ans, et 11 personnes allant de 70 à 92 ans. Il y avait 12 hommes et 16 femmes. Enfin, 8 sujets « novices » n'avaient aucune connaissance en informatique, 10 sujets « intermédiaires » avaient des connaissances en informatique et 10 sujets « expérimentés » avaient des connaissances en informatique et sur Internet. Nous avions utilisé trois tâches en termes de catégorie générale d'objectif (Recherche d'Information Précise, Réalisation d'une transaction, Recherche d'Information peu spécifiée), sur deux sites contrastés du point de vue de l'utilisabilité et offrant des services différents. Le site TRANS est un site de transactions en ligne, porteur de nombreux défauts d'utilisabilité. Le site INFO est un site d'information et de services spécifiques dont l'interface offrait peu de problèmes d'utilisabilité ou d'accessibilité. Chaque sujet pouvait participer à trois sessions, d'une durée allant d'1h à 1h30 mn chacune, et réaliser l'ensemble ou une partie des tâches, selon ses compétences et selon sa motivation. 16 sujets ont utilisé le site TRANS, les 13 autres ont utilisé le site INFO. Les passations étaient filmées avec l'accord de la personne et réalisées soit dans nos locaux soit dans un atelier d'informatique. Des entretiens de type « explicitation » accompagnaient la passation, afin de solliciter les verbalisations des sujets au cours de leurs actions ou de leurs « non-actions », d'inférer les processus cognitifs mis en œuvre, et d'identifier leurs difficultés, modalités d'utilisation et stratégies. Les données recueillies comprenaient les verbalisations, spontanées ou provoquées, et les actions du sujet au cours des tâches.

L'analyse des données a consisté en une sélection des protocoles de réalisations des différentes tâches (39 scénarios en tout) sur laquelle a été appliquée une grille de codage de l'activité. Cette grille distinguait d'un côté l'activité dite de navigation (définie comme le choix d'une « route », d'une « trajectoire » dans une situation donnée, en fonction des exigences de la tâche ; ici ce choix transparaît au travers des actions mises en œuvre par les utilisateurs pour accéder à l'information) et d'exploration (i.e la façon dont le sujet examine et traite l'information présentée ou accessible sur la page examinée du site). Les analyses statistiques ont visé à décrire les stratégies identifiées, l'influence des facteurs âge, niveau d'expertise et site utilisé.

Les résultats ont montré que **l'expérience avec l'outil informatique apparaît comme le facteur le plus explicatif des différences observées entre les groupes**, cela sur nombre d'indicateurs utilisés pour décrire le comportement des utilisateurs au cours de la réalisation des tâches. Le temps moyen passé par les sujets sur une page illustre cet effet : la durée passée sur chaque page décroît avec l'expérience (Tableau 2). Ce gain lié à l'expérience porte à la fois sur la manipulation de l'ordinateur (souris, clavier) et de l'interface, et sur la navigation dans les structures des pages et des sites. Le même effet facilitateur de l'expérience s'observe sur la proportion d'échecs dans la réalisation des tâches telle qu'on peut l'observer chez les participants de la classe d'âge la plus jeune (Tableau 3) ; toutefois **cet effet facilitateur ne s'observe pas chez les plus âgés**. Pour ces derniers, le taux d'échecs reste relativement stable et à un niveau moyen, quel que soit le niveau d'expérience. Les raisons pour un tel schéma de résultats sont toutefois diamétralement opposées : **chez les novices âgés, il y a une plus forte sollicitation d'aide implicite ou explicite**, illustrant le rôle modérateur de l'environnement (ici l'expérimentateur présent) sur les difficultés rencontrées. **Les sujets expérimentés les plus âgés, ont inversement rencontré un plus grand nombre de problèmes de lisibilité de l'information à l'écran**,

avec pour conséquence d'augmenter les possibilités de commettre des erreurs. Cette mauvaise performance illustre alors plutôt l'effet négatif d'un défaut d'utilisabilité. L'analyse montre aussi que l'ensemble des utilisateurs, indépendamment de l'âge et de l'expérience, a rencontré des difficultés similaires sur les sites, hormis la difficulté de la manipulation des dispositifs techniques (souris) spécifique aux novices. Ces difficultés renvoient en grande partie au non respect de critères ergonomiques traditionnels pour la conception des sites Internet, tels que la logique du site ne correspondant pas à la logique de l'utilisateur, des combinaisons graphisme et formes déroutantes, le recouvrement entre les fenêtres, etc.

Age/ Niveau	Novices	Intermédiaires	Expérimentés
58-69	3,80 (2,36)	1,98 (0,84)	1,42 (1,17)
70-92	3,59 (1,24)	2,05 (1,04)	1,24 (0,21)

Tableau 2.Temps moyen en minutes (écart-type) passé sur une page selon l'âge et l'expérience

Age/ Niveau	Novices	Intermédiaires	Expérimentés
58-69	83,33%	46,43 %	22,50%
70-92	50,00%	57,14%	50,00%

Tableau 3. Proportion globale d'échecs aux tâches observée dans chaque groupe selon l'âge et l'expérience.

La dimension de l'apprentissage a été étudiée au travers de la progression des participants, au fur et à mesure des essais et des sessions. La progression était analysée à deux niveaux : un niveau global, où l'on comparait le succès aux tâches d'une session à l'autre (Tableau 4), et un niveau fin où l'on comparait l'évolution des modes opératoires durant l'interaction avec les dispositifs critiques et représentatifs de l'interaction Web (formulaires, ascenseurs). L'analyse globale indique que (seuls) les novices s'améliorent, expérimentés et intermédiaires voyant leur performance diminuer. A un niveau fin d'analyse, à l'inverse, on constate d'une session à l'autre, comme à l'intérieur d'une même session, que les expérimentés améliorent les modes opératoires (en termes de vitesse). Les expérimentés tendent aussi à éviter la répétition d'erreurs précédemment commises. **L'apparente contradiction des résultats selon l'indicateur d'apprentissage** et la perspective adoptée amène aussi plusieurs réflexions. Apprendre à utiliser Internet ne se restreint pas à apprendre à utiliser un dispositif particulier d'interaction ; d'autres aspects entrent en jeu telles l'identification et la récupération d'erreurs, la compréhension même partielle du fonctionnement du système, l'anticipation et l'intelligibilité des objectifs disponibles, la motivation. L'évaluation de l'apprentissage peut ainsi conduire à des conclusions différentes suivant l'indicateur utilisé, d'où la nécessité d'en utiliser plusieurs pour aborder ce phénomène complexe. Un autre point est que l'apprentissage n'est pas un processus monotone : échecs et succès peuvent s'enchaîner au fur et à mesure des sessions.

Age/ Niveau	Novices	Intermédiaires	Expérimentés
Session 1	00,00%	62,50%	77,50%
Session suivantes	50,00%	42,86%	50,00%

Tableau 4. Proportion globale de succès aux tâches à la première session et aux suivantes selon l'expertise, tous sites confondus

Enfin, l'analyse des jugements exprimés par les sujets et des abandons en cours de tâche, montre que la persistance à utiliser un site dépend certes de son niveau d'utilisabilité, mais également et surtout, de la perception de son utilité intrinsèque par l'utilisateur. Les deux sites impliqués dans l'étude s'opposent en effet sur les deux plans : l'utilité en relation avec le type de service qu'ils proposent - le premier est un site de transaction, le second un site d'information - et, l'utilisabilité et l'accessibilité. Les avis convergeaient cependant : pour le premier site, la difficulté viendrait d'un manque d'intérêt par rapport aux fonctions offertes. Pour le second site, les difficultés découlent de son utilisabilité et de son accessibilité. Cependant, celles-ci engendrent un niveau d'abandon et de rejet du site moins important que dans le cas du site d'information. Il apparaît ainsi que lorsqu'un site répond à un critère d'utilité réelle ressentie, l'utilisateur est capable de développer des stratégies d'adaptation, malgré des difficultés d'utilisabilité et d'accessibilité importantes.

4.4.3 Défauts d'utilisabilité et apprentissage de l'utilisation d'Internet

Je finis la présentation de ces recherches menées sur l'utilisation et l'apprentissage d'Internet par un élargissement des résultats de l'étude précédente. Plusieurs études non publiées ont en effet été réalisées par la suite visant à comparer, avec d'autres classes d'âge et/ou profils de compétences initiales, certains des résultats obtenus dans l'étude avec les personnes âgées aux résultats obtenus. Ces études montrent que la conception graphique, l'organisation des informations, le contenu peuvent faciliter ou inhiber une exploration efficace, dans la mesure où ils interagissent à deux niveaux avec les caractéristiques de l'utilisateur. Le premier concerne le processus d'élaboration de connaissances et de stratégies opérationnelles permettant au sujet d'améliorer sa performance, au fur et à mesure de l'histoire de ses

interactions avec le site. Le second renvoie à la plus ou moins grande facilité à appliquer les stratégies et les connaissances déjà acquises par le sujet, afin de réaliser la tâche demandée. Ces deux niveaux déterminent à leur tour directement les caractéristiques d'intelligibilité et d'utilisabilité du site. Par exemple, dans une étude (Kerdal, 2001), on observait des résultats similaires avec un échantillon de 9 étudiants novices d'Internet mais familiarisés avec l'informatique (âge moyen= 22 ans). En premier lieu, **l'utilisabilité et la complexité du site avaient un effet direct sur le temps, le nombre de pages visitées, le nombre d'erreurs et la quantité d'assistance nécessaire pour atteindre l'objectif de la tâche**. Par ailleurs, on retrouvait entre les passations d'un site à l'autre des résultats similaires à ceux obtenus pour la classe d'âge la plus jeune de la précédente étude, à savoir : les performances s'améliorent au cours de la passation, d'un site à l'autre, se traduisant par un nombre moindre d'échecs et d'erreurs, une diminution du nombre de pages visitées pour atteindre l'objectif poursuivi, une demande d'assistance moindre et une meilleure compréhension. **Les difficultés concrètes associées à des défauts de conception relevées au cours de la passation sont globalement les mêmes que celles qui sont relevées dans la précédente étude avec les sujets âgés**. Toutefois, ces difficultés sont observables avec une fréquence moindre, d'autant qu'elles semblent plus souvent contournées ou compensées.

4.4.4 Conclusions

Les résultats de nos études sur l'apprentissage de ces outils issus des nouvelles technologies peuvent être lus de deux façons partiellement contradictoires. D'une part, on y observe un effet clair de l'expérience et de la fréquence d'utilisation sur la performance et la compréhension du logiciel, confirmant ainsi l'hypothèse selon laquelle l'apprentissage est au moins en partie dépendant de ces deux facteurs quant à ce type de logiciels interactifs grand public. D'autre part, on observe la récurrence d'erreurs, en partie similaires quel que soit le niveau d'expérience, rejoignant ainsi le constat fait par d'autres auteurs (par ex. Melyani, 1996 ; Ben-Ari, 1999). Apprendre à utiliser en utilisant l'informatique relève ainsi d'une certaine **(in)-efficacité paradoxale**. Efficace seulement pour partie, l'apprentissage échoue à mettre en place un modèle vraiment efficace du fonctionnement du logiciel.

L'utilisation et l'apprentissage qui en résulte reposent sur des stratégies de **mobilisation d'analogies** (par exemple avec d'autres logiciels) qui peuvent avoir, certes, un effet facilitateur, mais peuvent aussi bien engendrer un surcroît de difficultés pour l'utilisateur. Comme nous avons pu l'observer dans les trois études rapportées ici, les choix de conception des logiciels impliqués dans l'utilisation et l'apprentissage peuvent entraîner des difficultés du fait des appariements spontanés qu'évoquent les utilisateurs avec des exemples qu'ils connaissent. Dans l'une de nos études (Pelletier, 2001), on voit ainsi de façon flagrante que l'apparente similitude entre des logiciels peut avoir pour effet de masquer pour l'utilisateur - y compris expérimenté - les traits profonds déterminant la logique de fonctionnement du logiciel. A titre d'exemple, une différence peu perçue - au moins dans un premier temps - est qu'alors que Word et Excel travaillent sur un objet unique (le fichier), deux documents sont associés dans PowerPoint : le diaporama, d'une part, et le document d'accompagnement, d'autre part. Les défauts de conception relevés dans l'étude sur Internet fournissent également des **exemples plus classiques de difficultés** pour les utilisateurs comme la présentation et l'organisation de l'information.

Comme en témoignent les observations faites lors des études présentées sur l'apprentissage et l'utilisation d'Internet, l'apprenabilité effective d'un dispositif ne dépend toutefois pas uniquement des connaissances antérieures ni des propriétés de bonne présentation et de bonne organisation du système interactif considéré. L'étude auprès des seniors a ainsi permis de souligner que l'utilisabilité n'intervient que dans une certaine limite dans la persistance à s'engager dans l'apprentissage et l'utilisation effective d'une technologie émergente comme Internet. **D'autres facteurs également importants entrent en jeu, comme la motivation et l'utilité perçue, ou encore le soutien social**. L'utilité (ou l'absence d'utilité) est ainsi apparue comme un déterminant important de la persistance dans l'utilisation, en même temps que la persévérance à apprendre face aux difficultés rencontrées au cours de l'utilisation. La motivation à apprendre par l'utilisation dépend du reste plus de l'utilité que de la « bonne » utilisabilité du dispositif, en tout cas dans les situations d'usage et d'apprentissage volontaire, et pour les populations variées telles qu'impliquées dans les recherches rapportées ici. Le critère de l'utilité devrait ainsi être remis au centre de la réflexion de l'ergonomie des nouvelles technologies (Burkhardt & Sperandio, 2004). Les ressources disponibles pour la formation et évidemment le temps sont aussi autant de facteurs qui jouent sur l'apprenabilité d'un dispositif quel qu'il soit pour des utilisateurs précis considérés. Enfin, le cercle familial et social apparaissent en première ligne. L'apprentissage et l'utilisation de l'informatique semblent en effet s'effectuer fortement en interaction et au sein d'un réseau de personnes, mettant d'ailleurs en jeu des aspects relationnels et sociaux ne concernant pas forcément la tâche à accomplir sur l'ordinateur, selon des

stratégies comme l'appel à l'aide, le bouche à oreille, la constitution de réseaux d'échanges etc (Melyani, 1996 ; Sperandio, de la Garza et al., 1998a).

Enfin une telle efficacité incomplète de l'apprentissage par tâtonnement dans l'utilisation est à mettre en relation avec le fait que ce soit néanmoins le mode majeur d'apprentissage relevé dans nos études de terrain, qu'il s'agisse de l'environnement professionnel ou d'apprentissage volontaire dans le cadre des loisirs comme dans l'étude concernant la navigation sur Internet. Les entretiens et les réponses à des questionnaires en marge de nos études faisaient en effet apparaître une très faible proportion de mentions de formations formelles aux outils informatiques.

4.5 Apprendre ou comprendre au travers de l'utilisation (contributions empiriques)

Cette partie change de perspective sur le rapport entre utilisation et apprentissage. Dans les exemples qui suivent, l'objectif principal n'est ainsi pas d'utiliser un artefact pour l'apprendre, ni même pour améliorer la façon de l'utiliser. L'amélioration de la performance, pour beaucoup de raisons, n'y est pas l'objectif. **L'outil ou la structure d'information n'est qu'un moyen en vue de satisfaire un objectif d'apprentissage autre : extraire l'information qui puisse aider à résoudre un nouveau problème, ou aider à comprendre un phénomène.**

Les trois études qui suivent traitent de l'apprentissage au sens de l'extraction ou de la construction d'une sémantique voire d'une connaissance, à partir de l'utilisation d'un artefact. L'artefact peut lui-même avoir des propriétés variées : complexe et abstrait, ou au contraire concret. La question peut concerner ce que l'on est capable de comprendre sans avoir un modèle précis a priori du contenu ou de la forme de ce qui est à acquérir. Inversement, on peut très bien avoir un modèle de la connaissance de référence, et s'intéresser essentiellement aux conditions et aux façons dont elle est construite chez les sujets. En résumé, les travaux qui suivent se distinguent des précédents en ce que l'intérêt du chercheur se déplace de la construction de connaissances décrivant la mise en œuvre de l'artefact vers la construction de connaissances et de relations au travers de l'artefact ou son environnement.

4.5.1 Comprendre un artefact abstrait lors de sa (ré)utilisation pour résoudre un nouveau problème : exemple dans la conception orientée-objet

La nature des **connaissances extraites par les programmeurs lors de l'utilisation d'un programme** pour résoudre un nouveau problème est une question peu investiguée, de même que les mécanismes cognitifs qui sous-tendent cette activité de **compréhension**. Cette question s'avère pourtant centrale pour concevoir des outils et des méthodes de génie logiciel adaptés aux caractéristiques cognitives des concepteurs, en particulier lorsqu'il s'agit de favoriser l'utilisation de programmes ou de composants (désignée en génie logiciel par la notion de « réutilisation »). J'ai abordé cette question dans le **contexte particulier de la conception orientée-objet**, paradigme alors émergent en conception informatique. Dans cette recherche (voir Burkhardt, Détienne & Wiedenbeck, 2002), l'idée a été **d'étudier l'impact de la tache de (ré)utilisation sur la compréhension**, par comparaison avec l'effet d'un autre objectif écologique de compréhension que constitue la documentation du programme, en relation avec l'expertise. Les participants étaient des ingénieurs expérimentés et des étudiants en informatique.

La compréhension de programmes a ceci de particulier qu'elle concerne un artefact abstrait décrit sous la forme d'un texte exprimant, au moyen d'un langage formel, un ensemble de spécifications destinées à être interprétées par une machine. Les travaux en psychologie de la programmation ont abordé les mécanismes de compréhension de ce type de texte soit comme un double mécanisme de **Résolution de problèmes et de reconnaissance de plans** (par ex. Altmann, Larkin, & John, 1995 ; Robertson & Yu, 1990 ; Ye & Salvendy, 1996), soit comme l'élaboration d'un modèle mental dans la lignée des travaux et des propositions théoriques développés en psychologie de la compréhension de textes (Ehrlich & Tardieu, 1993 ; Kintsch, 1986, 1994 ; van Dijk & Kintsch, 1983). Dans cette seconde approche, **comprendre un programme consiste à construire progressivement une représentation mentale depuis un niveau de surface jusqu'au niveau d'un modèle décrivant la situation** (ou modèle mental) élaboré sur la base d'inférences, et fournissant la base pour de nouvelles inférences en faisant appel aux connaissances et croyances préalables du programmeur à propos du texte (par ex. Bergantz & Hassel, 1991 ; Burkhardt, Detienne, & Wiedenbeck, 1997, 2002 ; Pennington, 1987 ; Pennington, Lee, & Rehder, 1995 ; Teasley, 1994). Etudier ce qu'un programmeur construit comme modèle de situation à partir d'un programme requiert de se doter d'un **modèle explicitant les informations et les relations importantes décrivant le programme** (Tableau 5) comme par exemple l'échange de données entre blocs du programme, l'ordonnancement à l'intérieur des

séquences particulières d'opérations, la liste des objets représentés dans le programme. Le paradigme et le langage informatique considéré (i.e. la conception orientée-objet dans le cas présent) impose aussi des concepts et des constructions spécifiques dont il convient de tenir compte (par ex. la notion de classe et d'héritage). En outre, les caractéristiques d'implicite et d'explicite des langages ont une incidence sur la formation des connaissances, par exemple du fait des stratégies qui sont inhibées ou au contraire favorisées par les traits particuliers du langage (Davies, 1991).

Relations dans le texte	Domaines de connaissances mobilisés	Type de representation	Niveau
Flux de contrôle	Structure du texte	Dynamique	Surface/propositionnel
Opérations élémentaires	Structure du texte	Dynamique et fonctionnelle	Surface/propositionnel
Fonctions élémentaires	Structure du texte	Dynamique et fonctionnelle	Propositionnel
Objets du programme	Domaine du problème et plans de solutions	Objets	Modèle de Situation
Liens entre les objets du programme	Domaine du problème et plans de solutions	Objets	Modèle de Situation
Objets réifiés	Informatique et plans de solutions	Objets	Modèle de Situation
Buts principaux	Domaine du problème et plans de solutions	Fonctionnelle	Modèle de Situation
Client-fournisseur	Plans de solutions (plans complexes délocalisés)	Dynamique et fonctionnelle	Modèle de Situation
Flux des données	Plans de solutions	Dynamique et fonctionnelle	Modèle de Situation

Tableau 5. Modèle de la compréhension de programmes orientés-objets (Burkhardt et al., 2002)

Méthodologie. 51 sujets ont participé :

21 sujets en cours de formation au langage orienté-objet C++ et 30 sujets concepteurs de bon niveau dans le même langage. Selon le groupe, une tâche parmi deux leur était assignée. La première tâche consistait à comprendre pour éventuellement (ré)utiliser un programme « source » afin de contribuer à résoudre un problème cible posé, correspondant à un objectif de type *lire pour faire* (« read to do ») orientant la construction de la représentation vers la situation (ou la procédure d'utilisation) décrite dans le texte (Bergfeld-Mills, Dhiel, Birkmire, & Mou, 1995 ; Marnes, 1988 ; Schmalhofer & Glavanov, 1986). La tâche alternative correspondait à documenter le même programme en vue de faciliter sa compréhension par un autre (futur) lecteur-utilisateur, assimilable à une tâche de type *lire pour rappeler* (« read to recall »), orientant la construction de la représentation vers ce qui est dit dans le texte et comment. Le programme « source » à comprendre faisait 550 lignes de codes très peu documentées et comprenait 10 classes différentes correspondant à 23 fichiers écrits dans le langage C++. Le problème à résoudre pour les participants mis en situation de (ré)utilisation concernait la gestion d'une bibliothèque universitaire (Wing, 1988). Il était présenté sous forme d'un mini-cahier des charges concernant l'informatisation de la gestion d'une bibliothèque d'école contenant divers types d'ouvrages (revues, livres), différents types d'emprunteurs (professeurs, étudiants à différents niveaux de cursus) avec des contraintes spécifiques.

L'étude se déroulait en passation individuelle. Durant deux phases successives, les sujets devaient verbaliser leurs actions et leur raisonnement à haute voix. La première phase durait 35 minutes. Les sujets devaient étudier le texte du programme qui leur était fourni, avec l'objectif de le comprendre pour, selon la condition, l'utiliser en partie pour résoudre un nouveau problème de conception, ou bien le documenter. Le concepteur n'était pas autorisé à modifier le programme source lors de cette phase de compréhension. La seconde phase durait 90 minutes. Pour la moitié des informaticiens, elle correspondait à la tâche d'élaboration et de réutilisation effective. Pour l'autre moitié, il s'agissait de documenter le programme source étudié. Pour ces deux tâches, les concepteurs disposaient des mêmes fichiers sources, d'une version imprimée des fichiers, ainsi que des outils de développement et d'édition usuels sous Unix.

Les données recueillies correspondaient en l'enregistrement des actions et des verbalisations des concepteurs, de leur espace de travail à l'aide d'une caméra VHS ainsi que l'ensemble des actions réalisées sur la station de travail, au moyen d'un convertisseur d'images relié à un magnétoscope. Les traces de l'activité, et les fichiers résultants étaient également gardés. Le contenu et le degré d'élaboration de la représentation mentale du programme source étaient mesurés, à l'issue de chacune des phases de la passation, par le biais de questions administrées au concepteur à l'aide d'un dispositif informatisé de présentation et d'enregistrement des réponses. Deux questionnaires de 54 questions, ordonnancées selon deux ordres ont été construits de façon à refléter les différentes catégories d'information contenues dans le texte du programme à partir du modèle de la compréhension de programmes par objet (Tableau 5). L'analyse exploite deux approches suivant les données : une analyse de protocoles pour ce qui est des stratégies et de l'activité développée au cours des phases de compréhension initiale puis de réalisation de la tâche demandée (réutilisation vs. documentation) ; une analyse de la proportion de réponses correctes à chacune des catégories d'informations, lesquelles ont également été traitées de façon sommée pour évaluer l'évolution des niveaux propositionnels (modèle du programme) et du modèle de situation suite à la phase de compréhension puis de réalisation effective de la tâche.

Cette étude a permis de montrer que **l'expertise influence fortement les stratégies de compréhension et d'exploration d'un programme** (Burkhardt, Détienne, & Wiedenbeck, 1998). Malgré cette différence dans les stratégies, les résultats ont permis de montrer aussi l'effet remarquable de la tâche, en interaction avec l'expertise, sur la capacité des programmeurs à extraire des connaissances et à comprendre un programme. **La tâche de (ré)utilisation conduit des novices avec un niveau de connaissances plus faible à**

construire un modèle de situation équivalent à celui des experts auxquels la même tâche à réaliser était donnée. Inversement, les novices auxquels on demande de comprendre et d'expliquer le programme, sous la forme de commentaires insérés dans le texte de ce programme, ne parviennent pas à améliorer leur compréhension. Ce dernier résultat différait d'autres études sur la documentation (Riecken, Koenemann-Belliveau, & Robertson, 1991 ; Rouet, Deleuze-Dordron, & Bisseret, 1995), ce que la taille importante du matériel pourrait expliquer.

La tâche de (ré)utilisation pourrait être considérée comme une double tâche, à partir du moment où les sujets ont en parallèle à concevoir un nouveau programme pour résoudre le problème qui leur est donné. **Pour ce qui est des experts, le modèle de situation qu'ils ont construit lors de la première demi-heure de compréhension est au même niveau que leurs collègues experts ayant la consigne de documentation. Par contre, il ne s'améliore pas lors de la phase de réutilisation et la résolution du nouveau problème.** Ce groupe passe plus de temps à concevoir lors de cette seconde phase, plutôt qu'à réutiliser et donc à retourner étudier le programme. Ce résultat va dans le sens des stratégies décrites dans la littérature pour d'autres paradigmes, par ex. « as needed » (Littman, Pento, Letovsky, & Soloway, 1986), ou « relevance » (Koenemann & Robertson, 1991). **Inversement, les experts qui documentent continuent à améliorer leur compréhension** lors de la seconde phase. Cette interaction de l'expertise et de la tâche sur le niveau de compréhension élaboré peut s'interpréter en référence au cadre du raisonnement par analogie selon l'une ou l'autre des deux situations où un schéma est impliqué au moment de résoudre un nouveau problème à partir d'un exemple similaire (Gick & Holyoak, 1983). Dans la situation du novice, le problème à traiter est mis en correspondance avec un exemple précédent pour élaborer une solution analogue, sans que le programmeur ne prédispose d'une connaissance plus abstraite (schéma) en termes de solution au problème. Cependant, la mise en correspondance entre le programme source et l'élaboration de la solution au problème cible est susceptible d'induire la construction d'une connaissance abstraite à partir des deux situations analogues. Dans la seconde situation, l'expert dispose déjà d'une connaissance générique et peut directement élaborer une solution analogue à partir de son instanciation.

4.5.2 Comprendre les forces à l'échelle nanoscopique au moyen de l'utilisation d'un simulateur de nanomanipulation : quel effet du retour d'effort et de la fourniture d'analogie ?

A la différence de l'étude précédente qui portait sur un matériel abstrait et symbolique, **l'activité de compréhension concerne ici des phénomènes physiques habituellement non perceptibles.** Elle porte sur une technologie émergente – les dispositifs pour l'interaction haptique - encore peu investie au moyen d'une approche centrée sur l'activité humaine. La majorité des travaux est en effet réalisée soit sur un plan purement technique et algorithmique sans réelle évaluation, soit plus récemment par l'exploitation des paradigmes expérimentaux issus de la psychophysique dans la perspective de l'évaluation (Burkhardt, 2004a). Dans ce dernier cas, l'objectif est de produire des données sur la pertinence ou le paramétrage minimal des dispositifs et des techniques d'interaction au cours de leur mise au point (par ex. Dominjon, Lecuyer, Burkhardt, Andrade-Barroso, & Richir, 2005 ; Dominjon, Lecuyer, Burkhardt, Andrade-Barroso, & Richir, 2006 ; Dominjon, Lecuyer, Burkhardt, Richard, & Richir, 2005 ; Grosjean, Burkhardt, Coquillart, & Richard, 2002 ; Kadri, Lécuyer, Burkhardt, & Richir, 2007a, 2007b ; Lécuyer, Burkhardt, & Etienne, 2004 ; Lécuyer, Burkhardt, Henaff, & Donikian, 2006 ; Lécuyer, Burkhardt, Le Biller, & Congedo, 2005 ; Paljic, Burkhardt, & Coquillart, 2004). Le transfert de tels résultats vers l'évaluation de l'impact sur un usage réel et vers des activités plus représentatives du monde professionnel ou de la vie quotidienne n'est alors pas direct. Pour pallier cette limite, **je cherche à développer parallèlement des travaux qui mettent en scène, dans une perspective d'évaluation et de connaissance, des situations plus écologiques incluant de façon plus significative le niveau cognitif de l'activité**, par ex. des situations impliquant la construction d'un modèle de situation ou un raisonnement pour résoudre un problème.

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une coopération avec le CEA, le laboratoire ISIR et l'IRISA (Millet, Haliyo, Régnier, Lécuyer, & Burkhardt, 2007 ; Millet, Lécuyer, Burkhardt, Haliyo, & Régnier, 2008, soumis). J'y ai contribué essentiellement pour ce qui est de la mise au point du protocole d'évaluation, puis l'analyse des données. A plus longs termes, ce projet s'inscrit dans la recherche d'outils de formation et/ou d'assistance à la manipulation à l'échelle nanoscopique au moyen de la réalité virtuelle multimodale.

L'idée initiale de l'étude était **d'évaluer l'apport de l'information haptique et visuelle sur la compréhension des forces à l'échelle nanoscopique lors de l'utilisation d'un simulateur de nanomanipulation.** La compréhension des forces à l'échelle nanoscopique constitue en effet un enjeu de recherche récent du fait des difficultés d'apprentissage et de compréhension qu'elle engendre. En effet, les forces en jeu à cette échelle se comportent différemment de celles à l'échelle habituelle de l'expérience des

utilisateurs : les forces de surface (telle les forces d'adhésion ou de friction) dominent sur les forces liées à la masse (gravité, inertie), conduisant à un comportement radicalement différent des objets. Par exemple, il en résulte des effets de collage et d'accélération extrêmes, rendant la télé-nanomanipulation un défi encore difficile (Sitti, 2007) avec un microscope à force atomique (MFA). Dans le même temps, les manipulations au moyen de ce type de dispositif rendent accessible le comportement des éléments à cette échelle par l'interaction directe avec eux.

Méthode. L'étude a porté sur 45 sujets jeunes (entre 20 et 30 ans) auxquels était assignée la tâche de réaliser un ensemble d'essais de télé-nanomanipulation mettant en jeu de façon croissante les propriétés des forces à l'échelle du nanomonde. Aucun des sujets n'avait de connaissance préalable sur la mécanique à l'échelle nanoscopique. Il y avait quatre conditions expérimentales résultant du croisement de deux facteurs : la fourniture ou non d'un rendu haptique au cours de la manipulation, et le type de rendu visuel renvoyant soit à une représentation photo-réaliste soit à l'analogie de comportement avec un système ressort+aimant (Figure 14). L'étude comprenait deux étapes. Quatre groupes ont été constitués correspondant à chacune des conditions (rendu haptique+ visuel réaliste ; sans rendu haptique+ visuel réaliste ; rendu haptique + visuel analogique ; sans rendu haptique+ visuel analogique). Durant la première étape, la tâche consistait à approcher la poutre d'une cible puis à revenir au cours de quatre essais, sans limitation de temps. Lors du premier essai, le sujet avait à dessiner une courbe représentant les variations de la force en fonction du temps et de la distance. Puis il lui était demandé de choisir parmi un ensemble de 7 courbes. Par la suite, la mesure de performance à chaque essai consistait en le temps de réponse et le choix (correct vs. incorrect) entre 7 courbes possibles. En outre, des indicateurs ainsi que des questions et des productions graphiques et verbales sur ce que le sujet a compris des phénomènes étaient recueillis. Dans la seconde étape, les sujets devaient tester les quatre conditions proposées et les évaluer à l'aide d'une échelle de préférence sur trois critères : l'intelligibilité des phénomènes de forces à l'échelle nanoscopique la perception des forces et l'appréciation globale du retour. Le détail de la méthode et des résultats est donné dans Millet et al. (2008, soumis).



Figure 14. Représentation réaliste (gauche) vs. analogique (droite) de la poutre de télé-nanomanipulation

Les résultats ont montré que la présentation analogique et la présence d'information haptique ont un effet à des moments différents de la compréhension. **La représentation analogique visuelle a un effet facilitateur sur le choix de la courbe correcte, lors du premier essai.** Par la suite, c'est **la présence d'une information haptique qui conduit aux meilleures performances en termes de compréhension.** En outre, **l'activité développée par les sujets dans les situations avec information haptique diffère :** elle mobilise significativement plus longtemps en termes de temps consacré à dessiner et à tester le simulateur comme en termes de temps de décision du choix de la courbe correcte. Toutefois, l'interprétation en tant que telle de ce résultat n'est pas simple, car cela pourrait être dû à au moins deux raisons différentes : d'une part, un caractère plus engageant pour les sujets de pouvoir manipuler un simulateur pourvu d'un retour haptique dynamique ; d'autre part, plus probablement un apport supplémentaire d'information directe à intégrer au cours de la compréhension des simulations. **Les sujets qui réussissent bien sont en outre significativement meilleurs dans le dessin qu'ils produisent, ce qui en fait un indicateur pertinent supplémentaire pour mesurer la compréhension des sujets,** en plus du choix correct parmi les courbes.

Pour enrichir ce tableau, nous avons intégré une analyse des verbalisations produites par les sujets auxquels on avait demandé de décrire leur compréhension des phénomènes de forces en jeu dans la situation simulée. Une analyse thématique de contenu a permis de délimiter plusieurs catégories apparaissant dans les protocoles verbaux, comme la mention d'une analogie, la mention de forces de répulsion ou de résistance. Les résultats montrent que **le retour haptique facilite la perception et la prise en compte d'un paramètre particulier (la raideur) du comportement de la poutre**, qui transparaît plus fréquemment dans les verbalisations. Par ailleurs, les sujets qui ont une bonne réussite au premier essai semblent se répartir entre **deux manières complémentaires d'élaborer un modèle mental des phénomènes** testés au cours de la simulation. La première concerne les sujets évoquant une analogie (pouvant être induite par la condition de présentation visuelle, mais pas seulement : certains sujets évoquent

spontanément une telle analogie) qui exhibent une réussite au premier essai. Ces sujets ont par contre tendance à échouer à l'essai 4, c'est-à-dire lorsque la raideur intervient de façon sensible sur le phénomène. La seconde concerne les sujets qui évoquent l'idée d'une proportionnalité du ratio distance/force, ainsi que la dynamique du comportement lors de l'approche et de la rétraction de la poutre. Ces sujets réussissent lors du premier essai, et produisent un dessin correct. Enfin, au-delà de ces résultats, l'ensemble des sujets a montré une préférence pour l'assistance apportée par l'haptique et par la représentation analogique, la combinaison la plus appréciée étant l'haptique couplé à la représentation visuelle analogique.

4.5.3 Elaborer une interprétation à partir de la lecture tactile de motifs statiques et dynamiques

Cette troisième recherche est une étude exploratoire sur l'usage de la modalité tactile en vue de la conception de cartes tactiles. Elle a été menée dans le cadre d'une collaboration avec le CEA sous la forme d'un stage de master 2 et un travail de recherche de master 1. On trouvera ailleurs une description complète des travaux réalisés dans ce cadre (Megard et al., 2008 ; Mégard, Verhaeghe, Burkhardt, & Roselier, 2007).

Il s'est agi d'étudier la façon dont spontanément les sujets interprètent une stimulation tactile qui leur est proposée. Sur le plan applicatif, il s'agit d'engranger des résultats validés pour aider à la définition et à la sélection de motifs adéquats afin d'offrir un moyen d'accès à des légendes sous forme de textures tactiles sur des cartes multimodales visant l'assistance à la navigation pour une population non-voyante ou déficiente visuelle. L'idée de cette étude fait suite à des observations informelles auprès de sujets testant des dispositifs de retour tactile, suggérant qu'un même type d'association verbale pourrait être fait spontanément par différents sujets pour certains motifs tactiles, i.e. certaines configurations uniques de stimulations spatiales et temporelles appliquées sur une partie de la surface de la peau (Figure 15). Dans la mesure où une telle hypothèse serait vérifiée, cela ouvrirait la possibilité de sélectionner certains motifs avec de telles associations à une même étiquette sémantique (par ex. chemin, route, mur, tourner à droite). Qui plus est, cela s'accompagnerait alors probablement d'une meilleure efficacité que le choix de motifs arbitraires assignés à ces étiquettes.

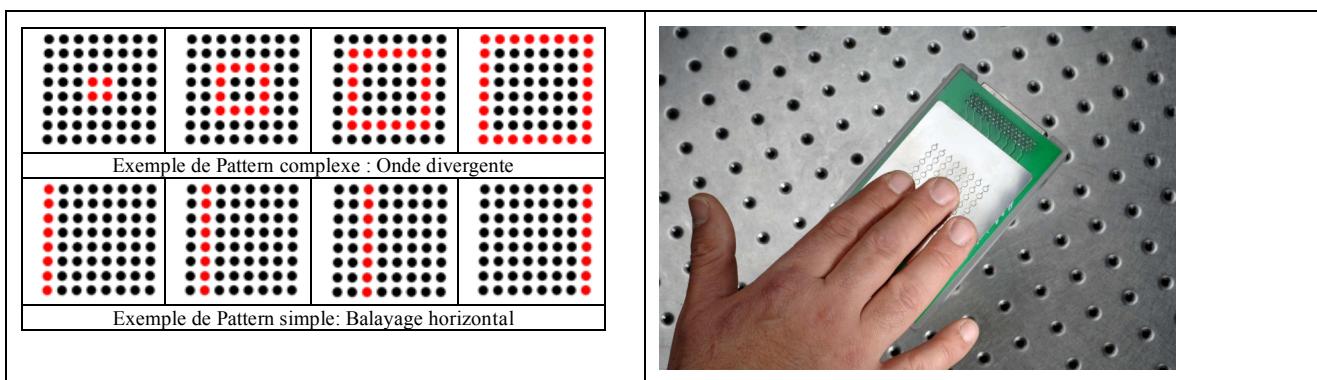


Figure 15. Deux exemples de motifs tactiles dynamiques (à droite) et prototype d'interface VITAL du CEA (d'après Mégard, Verhaeghe, Burkhardt, & Roselier, 2007).

Méthode. 40 sujets âgés entre 20 et 60 ans ont participé à cette étude. Un échantillon de 40 motifs tactiles leur était présenté, chacun successivement, selon un ordre contrebalancé entre les sujets, au moyen de l'interface vibro-tactile appelée VITAL développée au CEA. Pour chaque motif, le sujet était d'abord invité à indiquer s'il l'avait perçu, puis il lui était demandé de décrire le cas échéant. Enfin, on lui demandait d'éliciter toute association qui lui serait venue « naturellement » à l'esprit pour décrire et caractériser le motif. Enfin, il leur était demandé d'évaluer subjectivement le motif en termes d'agréable, de neutre ou de désagréable.

L'analyse a montré que tous les motifs ont été perçus par les sujets. Toutefois, seul un tiers a donné lieu à une description correcte des propriétés du motif (par ex. configuration de picots activés, forme statique, forme dynamique). Une minorité de motifs a été jugée désagréable, la majorité étant évaluée comme neutre ou agréable. Pour une bonne part des motifs (85%), il y a eu production d'une analogie pour décrire la sensation résultant de la stimulation tactile. L'analyse de contenu de ces analogies a permis de mettre en évidence un nombre restreint de catégories sémantiques (par ex. sensation, battement de cœur, liquide ; voir Figure 16). Les analyses subséquentes ont permis de montrer que certains motifs étaient associés de façon forte à une catégorie (par exemple, l'activation de l'ensemble à haute fréquence est associée par les sujets à l'idée de moteur ; la même forme avec une fréquence basse est systématiquement associée à la catégorie battement de cœur).

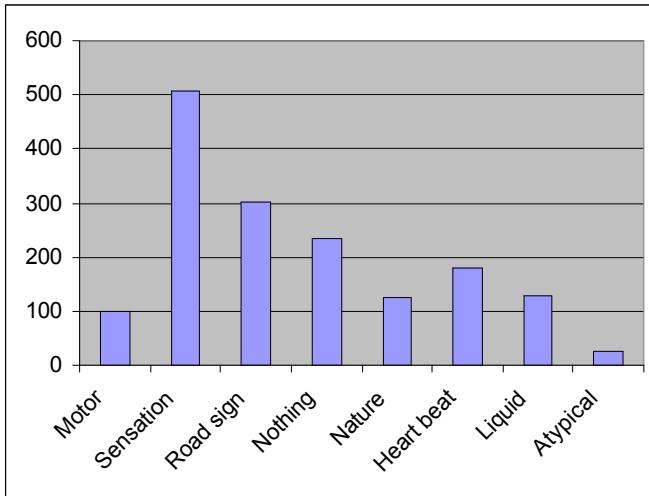


Figure 16. Effectifs des catégories sémantiques produites lors de l'exploration des motifs (Mégard et al., 2007)

Ce travail a donc mis en évidence une certaine capacité, peu investiguée, d'utilisation de l'information tactile dans un objectif d'apport d'information sémantique. Il a permis également de mettre en évidence certaines limites liée à l'usage, telle que la faiblesse de certains motifs exploitant les bords de la surface tactile du fait des multiples positionnements possibles des doigts par l'utilisateur sur le VITAL. Il reste que ce travail est une première étape, notamment du fait des limites de l'échantillon, en vue d'une utilisation dans le cadre du handicap visuel et d'un dispositif orienté-usage. Il a néanmoins permis de sélectionner quelques couples motifs-analogie, pour un prototype d'assistance multimodale à la navigation utilisant des légendes tactiles.

4.5.4 Conclusion

Cette deuxième perspective traitait de la nature et de contenu de ce qu'il est possible d'extraire, comprendre et apprendre à partir de l'utilisation d'un artefact – au-delà des connaissances spécifiques à l'utilisation lorsque l'artefact considéré est un outil.

Les exemples de recherches présentés visaient à mettre en lumière la variété des situations, des mécanismes et des informations traitées et construites par des utilisateurs qu'il est possible d'étudier à partir de situations d'interaction avec des artefacts issus des technologies émergentes. Dans la première étude, la compréhension s'inscrit dans le contexte de **l'utilisation d'un matériel abstrait et symbolique** et suggère l'intervention de mécanismes associés au raisonnement analogique. **L'information effectivement extraite est analysée en référence à un modèle préexistant de la représentation mentale à construire et des mécanismes qui sous-tendent cette construction.** Les résultats mettent en lumière l'influence de l'objectif de lecture sur les connaissances effectivement extraites du programme par les novices. Chez ces derniers, la tâche de réutiliser un programme pour résoudre un nouveau problème a pour effet d'engendrer un meilleur niveau de compréhension que la tâche de comprendre et d'expliquer le même programme, i.e. en réaliser sa documentation.

Dans la seconde étude, **la compréhension concernait la manipulation d'objets physiques réagissant selon des lois non habituellement perceptibles**, éloignées de l'expérience directe des sujets même si certains utilisateurs peuvent en avoir une connaissance mathématique a priori. Ce modèle mathématique constitue d'ailleurs une référence possible de la connaissance à construire. Peu de choses sont en revanche connues relativement aux **mécanismes qui permettent d'intégrer l'expérience haptique et le traitement de l'analogie visuelle pour expliquer la construction des connaissances chez le sujet**, au cours de la simulation. Le domaine est par conséquent à explorer.

Dans la troisième étude, **il n'y avait pas de modèle de référence spécifiant a priori ce qu'un utilisateur est capable d'extraire et de mémoriser** sur la base d'une stimulation cutanée au moyen d'un motif tel que ceux générés par les dispositifs vibrotactiles en cours de mise au point. D'une part, la littérature empirique est laconique en ce qui concerne la perception tactile de motifs abstraits. D'autre part, nous n'avions pas réellement d'idée a priori sur l'information effectivement traitée et discriminée par les sujets humains dans cette situation ; l'existence d'invariants éventuels et de **relations entre les propriétés de la stimulation tactile et les analogies produites consciemment par les sujets** constituait aussi une interrogation à l'origine de l'étude. L'analyse a donc été faite a posteriori sur la base d'une catégorisation à partir des données recueillies, plutôt que sur la base d'un test d'hypothèses.

4.6 Perspectives concernant l'apprentissage et l'utilisation

Ce chapitre a permis d'évoquer les rapports entre utilisation et apprentissage dans le domaine de l'ergonomie informatique et des technologies émergentes. Outre une synthèse mettant en lumière des approches alternatives dans la littérature, j'ai abordé deux axes d'investigation empirique selon la nature des connaissances acquises relativement à l'utilisation d'un artefact.

Le premier axe portait sur **l'apprentissage de l'utilisation**, c'est-à-dire d'une certaine façon l'apprenabilité effective des logiciels et des autres dispositifs issus des technologies. Le second traitait de **l'utilisation d'un artefact issu des technologies émergentes comme moyen d'apprentissage ou de compréhension** (la conception orientée-objet constituait à l'époque un nouveau paradigme en cours de diffusion dans la communauté informatique).

Ces deux axes d'études, s'ils forcent le trait sur des objectifs et des contenus d'apprentissage différents associés à l'activité au cours de l'utilisation, ne sont en fait pas mutuellement exclusifs. Les cas doivent même être rares où la seule connaissance qu'il est souhaitable de construire au travers de l'utilisation concerne uniquement les règles d'utilisation et de fonctionnement du dispositif. Qu'il s'agisse d'apprenabilité ou de médiation d'un apprentissage, ce qui est appris au travers de l'utilisation constitue ainsi un enjeu d'étude pour mieux comprendre les mécanismes et les connaissances sur le domaine et les objets pour lesquels l'artefact constitue un instrument pourvoyeur à la fois d'interaction pragmatique et d'interaction épistémique (cf. Verillon & Rabardel, 1995). Il en est de même pour ce qui est des transferts et des analogies susceptibles d'avoir un effet positif ou négatif dans le contexte de l'utilisation. J'en tire pour conséquence la nécessité de déployer d'autres approches que celle de l'évaluation sommative et restreinte à la seule mise en évidence d'une supériorité de la performance et/ou à la mesure de l'apprenabilité. En effet, **c'est moins la supériorité ponctuelle de telle ou telle condition que la compréhension de l'activité développée par les sujets, et la façon dont les facteurs impliqués dans l'expérimentation ont été intégrés dans la construction de cette activité**, qui me semblent intéressantes à aller rechercher. La raison est double : donner des pistes plus informées pour l'amélioration du dispositif, et mettre en lumière les questions relatives à l'activité des utilisateurs dans la situation, plutôt qu'en rester à une analyse en termes de bonne et moins bonne performance. En outre, cette posture me semble en accord avec l'idée que – en particulier lorsqu'on s'intéresse à des situations de type « apprendre par/ au travers de l'utilisation d'un dispositif » – il y a rarement une relation linéaire entre les caractéristiques des situations et l'apprentissage qui en résulte. Ce sont moins les propriétés de l'environnement à un instant donné, au début de l'expérience, que l'activité qu'y développe le sujet au fur et à mesure de ses interactions, qui a un intérêt en tant que donnée pour la conception. D'autant que cette activité peut affecter à son tour la façon dont les informations dans l'environnement sont traitées et comprises par les sujets.

4.6.1 Au-delà de l'apprenabilité, concevoir pour le développement individuel

L'apprenabilité, en tant que mesure du temps nécessaire à un utilisateur pour être capable d'utiliser le plus grand nombre de fonctions, constitue certes un critère de performance mesurable. Cette mesure ne suffit toutefois pas à épuiser le questionnement ergonomique en lien avec l'utilisation d'un dispositif issu des technologies émergentes. Plus que la mesure de l'apprenabilité dans un contexte contrôlé restreint donné, il me semble qu'une question intéressante du point de vue de l'ergonomie concerne les conditions requises et la capacité d'une telle mesure à prédire ce que l'on peut observer sur le terrain en termes de compétences réellement acquises par l'utilisation. Dans l'idéal, et pour des technologies qui sont souvent considérées comme simples et intuitives, l'utilisation répétée devrait s'accompagner d'une expertise se traduisant par une meilleure performance. Dans le cas inverse, il importe d'essayer de comprendre les facteurs qui, sur le terrain, expliquent la faible performance.

Des critiques sont formulées depuis quelques années concernant l'emphase sur l'apprenabilité comme propriété fondamentale de l'ergonomie d'un système, le propos n'est donc pas nouveau (voir par ex. Bannon, 1992). La principale ligne d'arguments consiste à souligner qu'une propriété fondamentale de l'activité humaine est le développement continual du sujet à travers l'activité mise en oeuvre dans les situations professionnelles (par ex. Draper, 1998 ; Soloway et al., 1994). L'utilisation des outils (issus de l'informatique) s'insère dans cette dynamique continue d'apprentissage et de développement des compétences tant sur soi et son métier que sur les outils exploités à cette fin. Nier cette dimension en même temps que les multiples facteurs tant individuels (par ex. connaissances, objectifs propres, motivation à apprendre) qu'environnementaux (par ex. contexte social et professionnel, ressources disponibles) qui l'encadrent revient aussi à réfuter la capacité de l'opérateur/utilisateur à développer son expertise.

L'évolution des compétences liées à l'utilisation est cependant considérée de façon centrale dans quelques approches, bien que selon des orientations différentes (Rabardel & Beguin, 2005 ; Vicente, 2002). Il se pourrait d'ailleurs que l'apprenabilité ne soit souhaitable que pour des utilisateurs « naïfs », et dans le cas de systèmes utilisés très occasionnellement et/ou ceux pour lesquels un investissement en termes d'apprentissage apparaît peu pertinent relativement à des critères de succès dans la réalisation de la tâche.

L'idée n'est évidemment pas de prôner la conception de systèmes qui soient difficiles à utiliser et à apprendre, mais bien de changer la hiérarchie des critères, en faisant **prévaloir l'utilité du système**, c'est-à-dire les capacités d'action qu'il profère, la flexibilité et sa puissance (Bannon, 1992). Parmi ces capacités, il convient de distinguer ce qui est de l'ordre du **soutien à l'atteinte des objectifs de la tâche** (ce qui est classiquement reconnu aujourd'hui, même si...) de ce qui est de l'ordre du **soutien au développement et à l'apprentissage**. Ainsi, la notion d'apprenabilité correspond de façon extrêmement partielle à ce second objectif, puisqu'elle restreint la cible de ce qui est à apprendre aux seules manipulations du dispositif.

4.6.2 Evaluer les technologies émergentes : passer de l'évaluation de l'utilisabilité à l'étude de l'activité déployée au cours de l'utilisation

L'ergonomie informatique, notamment dans sa centration la plus forte sur l'interaction humain-système, favorise largement la dimension d'utilisabilité – s'intéresse peu à l'apprentissage de l'outil, le cas échéant usant de paradigmes expérimentaux exploitant des durées très courtes. J'ai pour ma part essayé, autant que les possibilités technologiques et les contraintes de la conception le permettaient, d'orienter les situations d'évaluation et le recueil d'indicateurs vers une **prise en compte de l'activité plutôt que la mesure de la seule performance**. De mon point de vue, les seules mesures de performances sont insuffisantes pour comprendre les facteurs et les processus mis en œuvre par les « sujets » au cours de l'utilisation de ces nouveaux systèmes dans les situations d'évaluation, y compris si les situations ne sont pas écologiques dans le choix des tâches et de l'environnement comme dans la sélection des participants. **L'analyse de l'activité permet de contextualiser les performances obtenues**, tout en suggérant des interprétations et des nouvelles hypothèses qui sont plus à même d'orienter la suite de la conception. Dans le contexte de systèmes peu habituels pour eux, les participants sont mis en situation de **double tâche** : ils ont d'une part à **comprendre et utiliser le dispositif** qui leur est fourni, et d'autre part à **comprendre la tâche** qui leur est proposée, celle-ci étant souvent tout aussi inhabituelle. Une concurrence entre les deux tâches, voire une interférence est donc possible, l'analyse de la performance devant en tenir compte. Un des enjeux est d'ailleurs de trouver des tâches qui mettent les sujets en situation d'évoquer de façon spontanée l'objectif que l'on souhaite qu'ils se donnent. Dans le domaine de la réalité virtuelle par exemple, la majorité des propositions méthodologiques pour l'évaluation s'appuient aujourd'hui sur des scénarios issus de la psychophysique ou pour le moins extrêmement épurés. De même, les stratégies mises en œuvre par les sujets sont susceptibles d'affecter de façon significative la façon dont ils abordent la tâche. Il importe par conséquent d'en examiner finement la mise en œuvre dans la situation étudiée. Dans ce sens, c'est moins la propriété du dispositif que l'interaction entre les connaissances du sujet et son association à l'artefact qui est potentiellement source de difficultés ; un problème d'utilisation peut provenir d'un défaut dans l'artefact comme de la mobilisation d'une connaissance inopérante pour l'action, voire génératrice d'erreurs.

4.6.3 Etudier (aussi) ce qui est appris ou construit au travers de l'utilisation

L'idée d'**étudier ce que l'on est capable d'apprendre au travers de l'utilisation et de l'interaction avec un dispositif** me semble importante pour la recherche et la conception concernant les technologies émergentes. De nombreuses hypothèses sont faites aujourd'hui sur les technologies exploitant la multimodalité et la stimulation des canaux perceptifs comme « **améliorer** » l'efficacité ou encore comme le caractère plus « **naturel** » de ces outils issus de l'informatique. Il en est de même pour ce qui est des nouveaux environnements de communication médiatisés et de collaboration à distance. Les validations empiriques manquent certes déjà sur le plan des performances et des changements (souhaitables ou non) que ces outils issus des technologies impliquent. Les données manquent aussi grandement quant à leur impact tant individuel que social en termes des connaissances qu'ils permettent ou suggèrent de construire, ou encore en termes d'efficacité réelle qu'il est possible d'en attendre, faute de conditions d'apprentissage facilitées, une fois le stade de l'innovation franchi. **Appréhender les activités de compréhension, d'apprentissage ou de développement en lien avec l'utilisation nécessite un éventail de données riches**, par ex. performances, scores mais aussi verbalisations explicatives, dessins. Il s'agit en effet de tenter de suivre le cheminement des sujets au cours de l'utilisation du dispositif, plutôt que simplement mesurer une différence entre la performance initiale et son point d'arrivée à l'issue de la tâche expérimentale.

Formation et apprentissage

5 Formation et apprentissage

5.1 Introduction

Ce dernier chapitre thématique traite de l'ergonomie des technologies dédiées aux situations et aux outils pour l'apprentissage et la formation.

Deux domaines de recherches en lien avec les technologies sont évoqués ici. L'application des technologies émergentes à la conception d'artefacts et de situations instrumentées visant l'apprentissage humain renvoie principalement au domaine de recherches désigné aujourd'hui par les termes d'Environnements Interactifs pour l'Apprentissage Humain (EIAH). Les recherches menées sur la Réalité Virtuelle, Mixte et Augmentée constituent l'autre domaine technologique à s'être intéressé à la conception d'artefacts pour l'apprentissage et la formation à partir des années 1990. Ces deux domaines renvoient à des communautés distinctes de chercheurs et de praticiens. Des échanges et une mise en discussion des convergences possibles entre les deux communautés se mettent cependant en place depuis quelques années. Une école thématique sur les EIAH a ainsi été organisée en 2006 par J. Rogalski et M. Joab sur le thème « simulation et réalité virtuelle » (Burkhardt, 2006a ; Joab & Burkhardt, 2006). Une autre illustration, très récente, est l'exercice de prospective (projet ANR PREA 2K30¹⁷) que je coordonne avec G.-L. Baron depuis avril 2010 dans lequel ces communautés se sont regroupées pour animer ensemble les réflexions sur la recherche concernant les nouvelles technologies pour l'apprentissage et la formation (par ex. l'ATIEF - Association des Technologies de l'Information pour l'Education et la Formation, l'AFRV - Association Française de Réalité Virtuelle et augmentée et l'ARPDP – Association pour la Recherche et la Pratique en Didactique Professionnelle).

Comme je l'ai rappelé dans la première partie de ce document de synthèse (voir § 2.3, p. 31 et suivantes), les liens entre l'ergonomie et la formation professionnelle ne sont pas nouveaux. Néanmoins, ils ont été partiellement ignorés quand il s'est agi de considérer les contributions potentielles de l'ergonomie dans le contexte de l'exploitation des nouvelles technologies dans la formation. En particulier, l'analyse ergonomique de l'activité – qu'il s'agisse de l'activité de l'expert ou de celle de l'apprenant en situation de formation – reste encore une contribution peu perçue par les acteurs du domaine. De même, l'intérêt d'analyser le rôle et l'activité des formateurs au moment de la conception des artefacts technologiques pour la formation et l'apprentissage reste peu perçu. Inversement, un apport de l'ergonomie souvent sollicité réside dans l'amélioration de l'utilisabilité des interfaces selon une démarche centrée-utilisateur (bien que souvent centrée sur le seul aspect d'utilisation de l'artefact par l'apprenant) et par la fourniture de normes, de standards, d'heuristiques, de principes et autres critères ergonomiques pour la conception de l'interaction.

Les recherches que j'ai menées dans le contexte de ce type de projets sont de deux types. Le premier type porte sur les activités humaines variées dont l'étude est requise pour informer la conception d'un nouvel artefact pour la formation et l'apprentissage : les utilisateurs potentiels (apprenants mais aussi formateurs) mais aussi les situations et les activités susceptibles de fournir un modèle pour la conception de la situation. Le second concerne l'élaboration d'outils en vue d'une démarche ergonomique de conception d'artefacts technologiques prenant en compte les particularités des situations et des outils pour l'apprentissage et la formation. Ces outils font échos à des difficultés liées à l'activité de conception ou à des constats sur l'existant.

Le chapitre est organisé de la façon suivante.

La première partie constitue une synthèse sur les domaines de recherches des EIAH et de la Réalité Virtuelle, Mixte et Augmentée pour l'apprentissage. Certaines caractéristiques de ces projets sont présentées. Les spécificités de l'approche ergonomique pour la conception de ces technologies dédiées aux situations et aux outils pour l'apprentissage et la formation sont également évoquées.

Les deux parties qui suivent portent chacune sur un type de contributions. La première concerne des études empiriques menées dans le contexte - et à propos d'outils s'insérant dans - des situations de formation ou d'apprentissage. La seconde partie expose des contributions sous la forme de propositions méthodologiques ou d'outils en vue d'accompagner la conception dans ce contexte spécifique. Je conclus enfin sur des perspectives ouvertes pour une ergonomie des technologies émergentes oeuvrant dans le domaine des environnements et des technologies avancées pour la formation et l'apprentissage.

¹⁷ <http://prea2k30.risc.cnrs.fr/>

5.2 Des Environnements Interactifs pour l'Apprentissage Humain (EIAH) à la Réalité Virtuelle et Augmentée pour l'apprentissage et la formation (synthèse)

5.2.1 Les Environnements Interactifs pour l'Apprentissage Humain

La recherche sur les d'Environnements Interactifs pour l'Apprentissage Humain se situe à la croisée de multiples disciplines allant de l'informatique à la psychologie, à la didactique, aux sciences de l'éducation, à l'ergonomie. Elle se matérialise dans des **systèmes extrêmement variés** (par ex. simulateurs de conduite, hypermédias pour l'autoformation, cours diffusés sur Internet, collecticiels d'apprentissage) ayant en commun « la mise en relation d'une intention didactique et d'un environnement informatique » (Tchounikine, 2002b, p. 234). Cette variété est notamment liée à la multitude des usages ciblés, aux diverses combinaisons possibles entre des technologies dont les apports potentiels ou réels sont eux-mêmes fort variés (Burkhardt, Michel et al., 1998), ainsi qu'aux repères théoriques et pragmatiques qui fondent et motivent la conception (Burkhardt, Michel et al., 1998 ; Burkhardt & Wolff, 2002 ; De Vries, 2001). Les artefacts qui en découlent s'inscrivent par conséquent dans des configurations sociotechniques extrêmement variées. Certains ciblent la situation d'apprentissage individuelle et autonome. D'autres correspondent à l'outillage de situations de travail en groupe, de situations de tutorat distant avec un enseignant, ou encore visent à faciliter la réalisation d'une tâche en binôme.

De Vries (2001) a proposé de clarifier le domaine en distinguant huit catégories d'EIAH à partir de leur fonction pédagogique (Tableau 6 ; d'après De Vries, 2001) qui va de la simple présentation structurée d'un contenu à acquérir (**tutoriel**), jusqu'à la **simulation** et à **l'apprentissage par la collaboration**. Chaque fonction est associée à des présupposés théoriques (bien que ceux-ci ne soient pas toujours explicites dans la littérature) et à un type de tâche prescrite pour les apprenants. Ces fonctions ne sont toutefois pas exclusives, les logiciels incorporant souvent plusieurs de ces fonctions.

Fonction pédagogique	Type de logiciel	Théorie	Tâche prescrite à l'apprenant	Modalité de traitement appliquée aux connaissances ciblées
Présenter de l'information	tutoriel	cognitiviste	lire	présentation ordonnée
Dispenser des exercices	exercices répétés	béhavioriste	faire des exercices	association
« Véritablement » Enseigner	tuteur intelligent	cognitiviste	dialoguer	représentation
Captiver l'attention et la motivation de l'apprenant	jeu éducatif	principalement béhavioriste	jouer	
Fournir un espace d'exploration	hypermédia	cognitiviste, constructiviste	explorer	présentation en accès libre
Fournir un environnement pour la découverte des lois naturelles	simulation	constructiviste, cognition située	manipuler, observer	modélisation
Fournir un environnement pour la découverte de domaines abstraits	micromonde	constructiviste	construire	matérialisation
Fournir un espace d'échanges entre apprenants	apprentissage collaboratif	cognition située	discuter	construction de l'élève

Tableau 6. Classification des logiciels d'apprentissage d'après De Vries (2001)

L'analyse en termes de fonction pédagogique s'applique aussi aux caractéristiques des artefacts développés dans le champ de la réalité virtuelle et augmentée pour l'apprentissage. Ceux-ci exploitent le plus souvent un mélange de fonctions relevant du jeu, de l'espace d'exploration autonome mais aussi de la simulation et parfois de la construction à l'intérieur d'un micro-monde. La réalité virtuelle et la réalité augmentée permettent une exploitation intégrée des apports potentiels des technologies utilisées dans les EIAH (Tableau 7). Elles apportent aussi des potentialités en partie spécifiques (Burkhardt, Lourdeaux et al., 2003) comme l'immersion et la réintroduction du corps dans l'interaction, les trois dimensions de l'espace, ou encore la combinaison d'éléments du monde réel et d'éléments engendrés par l'ordinateur. Ces dernières propriétés sont intéressantes en ce qu'elles pourraient faciliter les transferts selon deux directions : du monde réel vers les mondes virtuels (par ex. exploitation d'habiletés et de connaissances usuelles) et des mondes virtuels vers le monde réel (par ex. proximité des compétences acquises).

Technologies	Principaux apports
Multimédia, multimodalités, visualisation de données, rendus (graphique, haptique, sonore, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> - Présentations statiques et dynamiques de l'information - Réification, représentations multiples, flexibilité des représentations - Délinéarisation, détexualisation des contenus - Combinaison de modalités en entrée/sortie
Réseaux	<ul style="list-style-type: none"> - Accès à des ressources à distance - Tutorat « en ligne » - Création de collectifs « virtuels », coopération et collaboration à distance
Informatique	<ul style="list-style-type: none"> - Interactivité - Contrôle, programmation partielle ou totale du cheminement - Individualisation (rythme, contenu, format...) - Modélisation des connaissances (domaine, apprenant, pédagogie)
Réalité virtuelle/ réalité mixte / réalité augmentée	<ul style="list-style-type: none"> - Immersion /présence - Réintroduction du corps/ spatialisation - Combinaison d'éléments du monde réel et d'éléments numériques

Tableau 7. Principaux apports des technologies aux EIAH (adapté de Burkhardt, Lourdeaux et al., 2003)

La conception des EIAH fait de plus en plus appel à l'ergonomie et à la psychologie. Une part croissante des travaux dans ce champ s'inscrit d'ailleurs dans une orientation didactique, en particulier pour ce qui est des technologies de type simulateurs (par ex. Boucheix, 2003a ; Luengo, Vadcard, Dubois, & Mufti-Alchawafa, 2006), témoignant du fait que la démarche ergonomique centrée sur l'activité et l'apprentissage commence à être reconnue. Depuis plusieurs années en effet, nombre de recherches ont porté sur la simulation et sur l'usage de simulateurs pour l'acquisition de connaissance et la formation. Ces travaux ont porté par exemple sur le diagnostic (par ex. Patrick, 1993), sur l'anesthésie (par ex. Nyssen & De Keyser, 1998), sur le contrôle de processus industriel (par ex. Kluwe, 1996), la gestion des feux de forêts (par ex. Rogalski & Samurcay, 1994 ; Samurçay & Rogalski, 1998), la formation de déficients mentaux travaillant en Centre d'Aide par le Travail (par ex. Sperandio & Oltra, 2002).

5.2.2 La Réalité Virtuelle, Mixte et Augmentée pour la formation et l'apprentissage

Les premiers développements d'Environnements Virtuels dédiés à l'apprentissage remontent aux années 1990. Dès la fin des années 1990, des applications de la Réalité Augmentée pour la formation et l'apprentissage sont également proposées. Le secteur éducatif a donné lieu à un investissement majeur aux Etats-Unis en ce qui concerne la réalité virtuelle. Les applications y ont majoritairement porté sur l'apprentissage de concepts scientifiques. En Europe, c'est moins le domaine éducatif que le domaine de la conception et de l'industrie qui a fait l'objet d'un fort soutien (par ex. le projet VR for Europe ou encore « Perf RV » plate-forme française de réalité virtuelle en France¹⁸). Les applications ont de ce fait plutôt concerné la formation d'adultes pour l'industrie. A l'instar de ce qui était observé dans le champ des EIAH, les environnements développés dans les domaines de la réalité virtuelle, mixte et augmentée se caractérisent par l'extrême hétérogénéité des configurations, des modes d'interaction et des prototypes.

Les applications des environnements virtuels et de la réalité augmentée pour l'apprentissage concernent principalement le secteur de la formation professionnelle, le secteur scolaire éducatif et enfin le secteur de la santé. Dans ce dernier secteur, la réalité virtuelle est utilisée à des fins de rééducation motrice ou comportementale pour les populations souffrant de déficits physiques ou mentaux (voir à ce propos Brown, Kerr, & Wilson, 1997 ; Klinger, Marié, & Viaud-Delmon, 2006 ; Riva, 2009). Ce dernier secteur ne sera pas abordé plus avant dans ce document pour des raisons de place et de spécificité du domaine.

Deux grandes catégories d'environnements se distinguent selon la nature de l'activité impliquée. La catégorie la plus représentée, aujourd'hui, correspond aux **Environnements Virtuels ou de Réalité Augmentée à « utiliser » tel quels par l'apprenant** et (éventuellement) par les formateurs. Cette catégorie recouvre l'ensemble des applications actuelles pour la formation professionnelle, et correspond à la grande majorité des applications offertes pour le monde éducatif. La seconde catégorie, développée uniquement dans le monde éducatif, et dans une proportion très faible relativement à la première catégorie (par ex. Barab, Hay, Barnett, & Squire, 2001), correspond aux **mondes virtuels/augmentés à construire ou à concevoir par les apprenants eux-mêmes**. S'inscrivant dans la lignée de la pédagogie active et du constructivisme, les apprenants sont mis par groupe en situation de devoir être concepteur d'un projet. L'hypothèse sous-jacente est que l'apprentissage provient moins de l'immersion et de l'interaction avec un

¹⁸ www.perfrv.org

environnement virtuel déjà développé et plus des interactions entre apprenants et des activités menées pour parvenir à la résolution du problème posé.

Je présente brièvement à la suite des exemples et les caractéristiques des systèmes développés.

5.2.2.1 Les Environnements Virtuels pour l'Apprentissage dans le secteur éducatif

Parmi les premiers systèmes développés pour le monde éducatif, on peut citer les trois « mondes » développés aux Etats-Unis dans le cadre du projet ScienceSpace (Dede, Salzman, & Loftin, 1996a ; Dede, Salzman, & Loftin, 1996b ; Salzman, Dede, Loftin, & Chen, 1999) : NewtonWorld (lois du déplacement et de conservation à la fois de l'énergie cinétique et dynamique des déplacements unidirectionnels), MaxwellWorld (nature des forces et des champs électrostatiques, concept de courant électrique et loi de Gauss) et PaulingWorld (structures moléculaires et interactions entre les molécules). La finalité de ces trois mondes est la remédiation des erreurs de conception relatives à des lois physiques chez les collégiens. L'apprenant commence par la découverte intuitive des lois au moyen de l'immersion multimodale et l'interactivité avec les objets au sein de l'environnement virtuel. Dans une deuxième phase, il y a explication des savoirs conceptuels correspondants, et éventuellement mise à l'épreuve au moyen d'une activité d'expérimentation avec les objets de l'environnement virtuel. D'autres travaux ont été menés selon cette direction, par exemple sur la compréhension des courants marins (Puget Sound : Winn et al., 1997 ; Winn et al., 1999). Enfin, le système NICE (Narrative-based Immersive Constructionist/Collaborative Environments ; Roussou et al., 1997 ; Roussou et al., 1999) constitue l'exemple prototypique d'approche constructiviste. Cet environnement virtuel propose un écosystème sur une île imaginaire. Des enfants de 6 à 10 ans organisent collectivement leur jardin, y sèment des plantes qu'ils conçoivent et peuvent intervenir sur les variables (ensoleillement, pluie...) afin d'observer les conséquences au fil du temps. L'environnement évolue en dehors de la présence des enfants qui, lors de leur nouvelle visite, peuvent alors constater les changements opérés.

5.2.2.2 Les Environnements Virtuels pour l'Apprentissage dans la formation professionnelle

Une analyse systématique d'environnements virtuels existants en 2004 nous a amené à délimiter trois grandes classes d'objectifs de formation (Burkhardt, Lourdeaux et al., 2005).

La classe d'environnements virtuels la plus représentée concerne **l'acquisition de méthodes de diagnostic ou de procédures** dans le domaine de la maintenance. Parmi les rares développés aux Etats-Unis, on peut citer VET (Virtual Environment for Training) pour la formation à la maintenance et à la conduite de compresseurs (Johnson, Rickel, Stiles, & Muro, 1999 ; Rickel & Johnson, 1999), d'une part et Hubble Space Telescope pour la formation des membres de l'équipe de vol de la mission de réparation du télescope Hubble (Loftin & Kenney, 1995). En Europe, on peut citer le prototype développé par EDF pour la formation à la méthode de diagnostic de pannes d'un Robinet Industriel (Frejus, 1998 ; Frejus, Drouin, Thibault, & Schmid, 1997). Piloté par le formateur au fur et à mesure des besoins de l'animation avec le groupe de stagiaires, l'environnement virtuel permettait de visualiser et d'interagir avec un robinet industriel présenté sur un écran. On peut citer également le projet SOFI/FIACRE (Formation individualisée des agents de conduite) initié à partir d'un démonstrateur réalisé avec l'Ecole des Mines de Paris à partir du milieu des années 1990 (Burkhardt, Lourdeaux et al., 1999 ; Lourdeaux, 2001 ; Lourdeaux, Burkhardt, Bernard, & Fuchs, 2002). Ce projet a porté sur l'usage de la réalité virtuelle pour la formation des agents de conduite sur lignes grandes vitesses aux procédures manuelles sur les aiguillages en cas de dysfonctionnement des automatismes. Couplé à FIACRE, le système de tuteur intelligent HAL (Help Agent for Learning) a permis de démontrer l'intérêt de ces technologies issues de l'Intelligence Artificielle pour un environnement virtuel d'apprentissage, afin d'analyser les erreurs de l'apprenant et de proposer des assistances et des choix d'actions aux formateurs. Ces travaux ont été poursuivis au sein d'une architecture générique logicielle pour les environnements virtuels d'apprentissage dans le cadre du projet APLG (Atelier Pédagogique Logiciel Générique) (Lourdeaux, 2005), puis de plusieurs projets encore en cours pour les derniers. Enfin, on peut citer également les travaux sur l'outil GVT (GIAT Virtual Training) développé par Nexter pour la formation des opérateurs à des tâches de maintenance sur des équipements (Cazeaux et al., 2005).

Une seconde classe d'environnements virtuels correspond à ceux dont **l'objectif est la formation ou l'entraînement au geste**. La possibilité d'instrumenter le geste dans un espace en trois dimensions en fonction du temps est à l'origine de nombreux travaux dans le domaine de la réalité virtuelle. Peu de systèmes existent cependant dans cette orientation. On peut citer l'environnement virtuel de formation au geste du soudage CS WAVE (Da Dalto, Balet, Duchon, & Mellet-d'Huart, 2005 ; Mellet-d'Huart, 2006) où l'apprenant manipule une torche de soudage dont la position est suivie en temps réel afin de souder des pièces représentées sur un écran. Récemment, le geste est un composant central dans l'environnement virtuel développé pour NEXTER dans le cadre du projet PERF RV2, puisqu'il s'agit de retranscrire, dans un environnement virtuel peuplé d'agents virtuels, la commande gestuelle utilisée sur le terrain dans les

manœuvres d'attelage et de remorquage utilisées lors du dépannage d'un char de combat. Dans un registre différent, l'outillage du geste chirurgical ou médical au moyen d'environnements virtuels couplés à des dispositifs haptiques et à de l'imagerie sont aussi des domaines aujourd'hui actifs (par ex. Bibin, Lécuyer, Burkhardt, Delbos, & Bonnet, 2008)

Enfin, une dernière classe d'objectifs concerne **la formation au commandement, à la prise de décision, à la gestion de crise** ; plusieurs systèmes ont été développés avec cette orientation. Avec des configurations et des options pédagogiques différentes, on peut citer les travaux autour de SécuRéVi (Buche, Querrec, Loor, & Chevaillier, 2003 ; Querrec, 2002) pour la formation des officiers sapeurs-pompiers à la prise de décision lors d'interventions sur des sites à risques classés SEVESO, ou encore ceux développés par EMI dans le cadre de la formation à l'intervention sur feu de forêts (Burkhardt, Lourdeaux et al., 2006). Je citerai également le projet SAGECE auquel je participe actuellement ; ce projet porte sur la formation à l'activité inter-services de gestion de crise. On peut enfin citer les extensions récentes du tuteur intelligent STEVE (SOAR Training Expert for Virtual Environment) intégré dans un environnement virtuel pour la formation à des missions de maintien de la paix (Johnson et al., 1999 ; Rickel, Gratch, Hill, Marsella, & Swartout, 2001 ; Swartout et al., 2006).

5.2.2.3 La Réalité Augmentée pour la formation et l'apprentissage

Il existe un nombre limité d'objectifs de formation, de contextes d'utilisation et d'utilisateurs ciblés par les prototypes de Réalité Augmentée existants (Anastassova, Burkhardt, Mégard et al., 2007). Le nombre de modalités sensorielles exploitées y est réduit et, selon les prototypes, la situation de formation considérée est caractérisée par l'autonomie de l'apprenant (autoformation) ou bien basée sur la mise en relation avec un expert de la tâche. Trois grandes classes de systèmes se distinguent selon l'objectif de formation visé.

Un objectif très fréquent est **l'apprentissage rapide de procédures, notamment sur le poste de travail**. Les applications dans cette catégorie visent essentiellement la formation professionnelle à la maintenance industrielle (Zhong, Liu, Georganas, & Boulanger, 2003), à l'assemblage (Boud, Baber, & Steiner, 2000) et l'entraînement militaire (Kirkley et al., 2002). Le principe est d'afficher devant les yeux de l'utilisateur, rapidement et à des moments appropriés, des éléments invisibles par un opérateur non-outillé, par exemple, des trajectoires de montage, les outils à utiliser (Schwald & De Laval, 2003).

Un deuxième groupe de systèmes selon l'objectif concerne **l'aide à la visualisation et/ou à la manipulation de mondes physiques et conceptuels par ailleurs difficilement représentables ou accessibles**, comme par exemple les systèmes planétaires (Shelton & Hedley, 2002) ou certains concepts géométriques (Kaufmann & Schmalstieg, 2003). Ce groupe est surtout représenté dans le domaine de l'éducation, même si un nombre limité de systèmes avec des visées analogues est utilisé pour la formation professionnelle. Par exemple, un prototype pour la formation médicale affiche et aligne spatialement et temporellement, sur un écran d'ordinateur conventionnel, des données écho-cardiographiques provenant d'un appareil réel et un modèle de cet organe en trois dimensions (Weidenbach et al., 2000).

Enfin, un troisième groupe d'objectifs de formation, peu discuté dans la littérature, fait référence à **l'aide apportée au formateur - plutôt qu'à l'apprenant - pendant l'animation d'un cours** magistral en présentiel. Citons dans cette orientation le prototype de la "salle de classe du futur" (Cooperstock, 2001) où le prototype prend le rôle de contrôleur des technologies de présentation (projecteurs, éclairage, logiciels de présentation, etc.).

5.2.3 Evolutions actuelles dans la recherche sur la réalité virtuelle, mixte et augmentée pour l'apprentissage

Les environnements virtuels et augmentés, en tant qu'outils issus de technologies encore en émergence, sont majoritairement du domaine de la recherche, avec logiquement une hiérarchisation des objectifs où le verrou technologique prévaut sur la réponse précise à un besoin (cf. chapitre 2, § 2.1.2). Dans les projets, **le défi est donc encore souvent technologique, plutôt qu'«applicatif » au sens de l'atteinte d'objectifs pour la formation et pour l'apprentissage**. Les défis techniques actuels pour la recherche concernent par exemple la question du recalage entre les entités du monde physique et les étiquettes digitales liées dans les applications de la réalité augmentée à la formation (Anastassova, Burkhardt, Mégard et al., 2007), **la mise au point de nouveaux dispositifs plus « intuitifs » pour l'interaction** dans un espace tridimensionnel pour ce qui est à la fois de la Réalité Augmentée et de la Réalité Virtuelle, ou encore **l'immersion et la présence** dans le contexte des environnements virtuels (Burkhardt, Bardy et al., 2003).

Pour cette même raison, fort logiquement, les applications présentées dans les articles et les démonstrations sont pour la plupart des applications illustratives, voire « jouet » ; la conception n'est pas

ancrée sur une analyse fine d'un problème de formation auquel une plus value en termes de réponse est recherchée. Toutefois, il convient de moduler ce constat sur la base des évolutions prometteuses au sein de la communauté de la réalité virtuelle et augmentée, notamment en France. Aujourd'hui, **les projets semblent plus fréquemment initiés à partir de besoins réels de formation, ou intègrent 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 valorisable sur le terrain. Même si il est encore peu fréquent d'opérer une évaluation des projets sur la base d'objectifs autres que des critères de performance technique. De même, il y a une réelle demande pour des méthodes et les démarches centrées sur les utilisateurs (formateurs et apprenants) et les situations d'usage, plutôt que focalisées uniquement sur la spécification technique du produit. Ainsi, les méthodes construites spécifiquement dans ce champ technologique ont très vite eu la préoccupation d'intégrer une dimension ergonomique (cf. Bowman, Kruijff, LaViola, & Poupyrev, 2004 ; Burkhardt, Lourdeaux et al., 1999 ; Fencott, 1999 ; Fuchs & Burkhardt, 2003 ; Gabbard, Hix, & Swan, 1999 ; Wilson, D'Cruz, Cobb, & Eastgate, 1996) en général, et en particulier pour ce qui est des applications pour l'apprentissage et la formation. Enfin, **il est de plus en plus reconnu l'importance de la constitution d'équipes de conception pluridisciplinaires où l'expertise et les expériences se complémentent pour enrichir le point de vue développé à l'intérieur du projet** : solutions techniques, problématique de formation, terrain, utilisation et ergonomie. L'évaluation et l'élaboration d'outils pour la conception de ces applications constituent ainsi un axe de recherche important.

Une autre thématique de recherche, commune à la conception de ces nouveaux environnements virtuels ou augmentés pour la formation et l'apprentissage, concerne **la question de la modélisation** (Burkhardt, 2009). Dans ces nouveaux outils, les scénarios développés pour l'interaction didactique et l'apprentissage impliquent en effet des liens complexes avec un ou plusieurs environnements réels de référence, les objets qui le composent, voire de plus en plus avec des humains « virtuels » qui sont susceptibles d'y opérer. Il devient alors nécessaire de se doter de « modèles » de ces différents composants extraits de la réalité, pour pouvoir les « incorporer » dans la trame d'une session de formation, qu'il s'agisse d'un environnement virtuel ou de l'enrichissement du monde réel au travers d'un outil de réalité augmentée. La notion de modèle renvoie évidemment aussi aux « modèles de l'apprenant », qui constituent une question de recherche aujourd'hui dans les environnements de réalité virtuelle ou augmentée pour la formation. Je reviens sur ces points dans une section à propos de l'outillage de la conception, dans la mesure où plusieurs travaux menés avec des collègues informaticiens portent sur ce dernier aspect (voir notamment ce chapitre, § 5.5.3).

5.2.4 Quelques considérations sur les projets de formation associés à l'innovation technologique

Les demandes et les orientations de nombreux projets suggèrent quelques tendances récurrentes dans la façon d'appréhender l'apport des technologies aux questions de la formation professionnelle et de l'éducation. Ces tendances, si elles ne sont pas analysées, peuvent engager les projets dans des voies peu adaptées du point de vue des besoins réels, amenuisant du même coup le potentiel de la technologie en cours de développement. J'en liste certaines à la suite.

5.2.4.1 L'ergonomie y est plutôt associée à la conception et à l'évaluation de l'utilisabilité de l'interface

L'utilisabilité des dispositifs d'un côté, et l'évaluation expérimentale de performances d'apprentissage de l'autre côté constituent les deux principaux axes reconnus de l'intervention de l'ergonomie et de la psychologie, qu'il s'agisse de recherche ou d'application (voir par ex. Bétrancourt, 2007 ; Burkhardt, Michel et al., 1998 ; Jamet, 2006 ; Tricot & Plégat-Soutjis, 2003). L'utilisabilité et l'interface constituent de ce fait le plus souvent les (seuls) problèmes perçus comme relevant de l'ergonomie. Cela a pour effet des (demandes d') interventions essentiellement de type évaluation, s'inscrivant très en aval voire à la fin du processus de conception. Même si cette contribution est également parfois sous-estimée, voire assimilée au bon sens. Ainsi, peut-on parfois lire que « Les travaux de recherche sur l'interaction homme-machine, qui abordent par l'ergonomie et la psychologie cognitive (...), sont certainement à intégrer dans la conception de nouvelles pratiques pédagogiques. Mais le responsable d'un projet d'ingénierie pédagogique n'a pas à attendre ces résultats pour intégrer ces phénomènes d'interaction dans l'architecture d'un système qu'il construit. Faisant un usage intensif de ces prothèses, il peut, en s'astreignant à une analyse introspective des effets personnels qu'elles produisent sur lui-même dans sa pratique quotidienne, obtenir des observations de bon sens très utiles pour guider les préconisations qu'il formulera. » (Peccoud, 2000, p. 97). J'ai discuté ailleurs quelques-unes des façons dont l'ergonomie est appréhendée par les autres acteurs dans le cadre plus général de la conception informatique (par ex. spécialiste de l'aménagement physique du poste, pompier,

représentant des utilisateurs) et, le cas échéant, certains des problèmes que cela peut engendrer (voir Burkhardt & Sperandio, 2004).

5.2.4.2 Une attraction pour l'autoformation et une focalisation sur l'apprenant

Dans de nombreux projets, comme dans les demandes spontanées qui émanent de l'industrie, **l'autoformation** est spontanément évoquée comme la situation à outiller par les technologies émergentes. Au-delà de cette situation, les demandes portent souvent sur l'obtention de la plus grande autonomie possible des apprenants comparativement à la situation de formation en face-à-face.

Il semble aussi que les technologies d'apprentissage pressenties se focalisent souvent sur **la seule relation apprenant-outil** et/ou sur l'apport de la technologie à l'atteinte des objectifs d'apprentissage. Or la dimension de l'activité des formateurs est à considérer au même titre que celle des apprenants (Burkhardt, Michel et al., 1998), et ce d'autant plus qu'il s'agit d'assister aussi les interactions didactiques entre ces deux catégories d'acteurs. On observe enfin une **tendance à ne pas considérer les apprenants comme contributeurs à part entière** lors de la construction des besoins. Ils sont souvent sollicités au travers des seuls tests de validation finaux, ou comme évaluateurs de la maquette, dans le but d'aider à identifier les difficultés d'utilisation, mais ils ne participent pas comme co-élaborateurs du besoin au sein de l'équipe de conception.

5.2.4.3 Une « appropriation » parfois superficielle des théories psychologiques de l'apprentissage

Un problème souligné par nombre d'auteurs (par ex. Burkhardt & Wolff, 2002 ; Dillenbourg, Poirier, & Carles, 2003) est le flou et l'appropriation parfois approximative de concepts et théories de l'apprentissage dans le champ de la conception des technologies émergentes visant des situations d'apprentissage. Les travaux s'appuient par exemple sur des modèles (parfois implicites) faibles voire naïfs de l'apprentissage, ce qui a pour effet de rendre la conception fortement « drivée » par (et centrée sur) les caractéristiques de la technologie en cours d'émergence : par ex. lecture de contenu à l'écran ou parcours d'une arborescence où les noeuds sont tacitement associés à de la « connaissance » (Burkhardt, Michel et al., 1998 ; Burkhardt, Specht, Ronca, & Michel, 1998). Il en est souvent de même en ce qui concerne les tâches assignées aux apprenants dans les Environnements Virtuels de Formation, lesquelles ont longtemps consisté pour l'essentiel à faire de la navigation et à visiter.

Il en est probablement de même de l'appropriation de certaines notions techniques, de la part des psychologues ou des ergonomes. Il est par conséquent remarquable et heureux de constater aujourd'hui les rapprochements tangibles entre les communautés issues des disciplines technologiques et celles issues disciplines des Sciences Humaines telle que Psychologie, Ergonomie, Sciences de l'Education etc., au travers de l'organisation de manifestations scientifiques communes, d'études et de projets en partenariat.

5.2.4.4 Peu d'hypothèses précises et d'évaluations sur les bénéfices attendus

Il apparaît enfin important de continuer à clarifier les modèles et les hypothèses concernant l'apprentissage et les scénarios d'utilisation des technologies. De nombreuses affirmations sont faites sur l'amélioration portée par les technologies émergentes. La réalité augmentée comme la réalité virtuelle ne font pas exception, et les hypothèses superlatives sont légions. Pourtant, les nombreux prototypes sont proposés sans qu'un retour clair sur les outils et les usages envisagés (ou réalisés) soit possible pour stimuler la recherche à propos de leurs usages dans le cadre la formation. En particulier, la définition des tâches associées à l'activité des différents utilisateurs est critique, bien que peu considérée par la littérature au profit de la description précise de l'artefact lui-même (Burkhardt, 2002 ; Burkhardt, Michel et al., 1998). Les modèles et théories, de mêmes que les études empiriques développées dans le champ de l'ergonomie et de la psychologie constituent de ce point de vue une source importante dans la démarche de conception des nouvelles situations de formation et d'apprentissage avec les technologies émergentes.

L'usage de la Réalité Virtuelle pour la formation et l'apprentissage commence à être documenté dans la littérature, avec notamment des évaluations. Ces évaluations portent toutefois souvent sur l'utilisabilité ou sur des paramètres autres que l'apprentissage et l'atteinte d'objectifs de formation. Pour ce qui est de la Réalité Augmentée, peu de données objectives viennent aujourd'hui étayer les hypothèses concernant l'efficacité et l'utilisabilité de cette technologie. La RA se révèle efficace essentiellement pour la présentation d'un feedback sur l'avancement d'une tâche, réalisée en parallèle avec d'autres tâches, ou pour l'assistance au rappel. Plusieurs revues de la littérature (Anastassova, Burkhardt, Mégard et al., 2007 ; Burkhardt, Michel et al., 1998 ; Burkhardt & Wolff, 2002) m'ont ainsi conduit à souligner 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 des contributions réelles apportées par l'utilisation de ces nouveaux outils.

5.3 Perspectives et approches de l'ergonomie informatique et des technologies émergentes sur les situations et les usages liés à la formation (Synthèse)

Cette partie présente une synthèse des perspectives et des approches de l'ergonomie spécifiquement liées au contexte des technologies émergentes pour les situations et les usages liés à la formation. Les contributions générales de l'analyse du travail et de l'activité à la conception des situations de formation, ne sont par conséquent pas rappelées puisque déjà mentionnées dans le chapitre 2 de ce document.

Ces contributions peuvent se distinguer selon qu'elles privilient une approche générique des conditions et caractéristiques de l'artefact en lien avec l'apprentissage ou bien l'étude de l'activité dans ses dimensions spécifique au projet considéré. Dans ce deuxième cas, les études prennent la perspective de l'apprenant dans son activité d'apprentissage ou, au contraire, s'intéressent plutôt à l'activité des formateurs/enseignants, voire à l'interaction entre formateurs et apprenants.

5.3.1 Les approches génériques en ergonomie et en psychologie pour assister la conception

5.3.1.1 Etudes sur les propriétés générales en lien avec l'apprentissage et les performances d'utilisation

De nombreuses études ciblent les propriétés génériques d'usages des technologies émergentes en regard de la psychologie de l'utilisateur individuel. Un premier type d'études se focalise sur l'apprentissage, tandis qu'un second priviliege la perspective de l'ergonomie de l'interaction utilisateur-système.

Le premier type regroupe les **travaux expérimentaux sur les processus cognitifs de base, en lien avec les caractéristiques de certaines technologies d'apprentissage**, tels les travaux sur la compréhension, l'apprentissage de procédures, la mémorisation, la mémoire de travail, la recherche d'information. Ces travaux participent de la construction de théories et modèles utilisables pour l'analyse et le guidage de la conception des technologies d'apprentissages. Ils permettent par exemple de mettre en relations les performances, les exigences de la tâche et les mécanismes cognitifs associés à l'utilisation d'un matériel informationnel pour l'apprentissage. Les travaux sur le traitement des informations dans les hypertextes (par ex. Rouet & Tricot, 1998), sur le rôle des illustrations et des animations (par ex. Mayer & Moreno, 2002), sur les outils de collaborations en ligne (par ex. Clark, Sampson, Weinberger, & Erkens, 2007) en sont des illustrations.

Le second type de travaux regroupe les évaluations diverses concernant la performance des systèmes ou l'interaction des utilisateurs, ainsi que les éventuelles conséquences des propriétés des technologies émergentes sur les utilisateurs, voire la validation de nouveaux paradigmes d'interaction qui s'y élaborent. La majeure part de ces études porte sur **l'utilisabilité et l'amélioration des performances au moyen de tâches élémentaires choisies comme représentatives des besoins d'interaction** liés à l'utilisation des technologies ciblées : pointage, sélection, appariement, navigation, communication, résolution de problèmes etc. Dans le domaine de la réalité virtuelle et augmentée, on notera ainsi des thématiques fortement développées sur les axes suivants : **interaction « naturelle »** dans l'espace tridimensionnel, **représentation des utilisateurs, immersion** - téléprésence et, plus récemment encore, la **coopération** (Burkhardt, 2003b ; Burkhardt, Bardy et Lourdeaux, 2003; pour une synthèse récente, voir Burkhardt, 2007).

5.3.1.2 Normes, critères, standards ergonomiques applicables dans le cas des technologies d'apprentissage

Il existe un très grand nombre de critères et standards dans le domaine de l'ergonomie des logiciels. Ceux-ci combinent souvent des avis issus d'experts, des réflexions sur l'expérience ou encore des synthèses de travaux empiriques menés en ergonomie et en psychologie. L'un des recueils de recommandation les plus connus est probablement le «Guidelines for designing user interface software » de Smith & Mosier (1986), accessible aujourd'hui sur Internet à <http://hcibib.org/sam/>), tandis que les principes de haut niveaux les plus cités sont probablement ceux de Nielsen (Nielsen & Mack, 1994).

Il y a inversement peu de normes ou critères ergonomiques spécifiquement dédiés aux logiciels et technologies pour l'apprentissage. Des principes de haut niveaux sont proposés pour guider les choix et la

conception d'outils pour la formation et l'éducation (par ex. Laurillard, 2002 ; Squires & Preece, 1999). Sur le plan de la conception des interfaces, il existe également des principes ou des critères souvent focalisés sur un type de technologie ou d'approche du point de vue de l'apprentissage (par ex. Ainsworth, 1999 ; Bétrancourt & Tversky, 2000 ; voir aussi Jonassen, 2004 ; Mehlenbacher et al., 2005 ; Najjar, 1998 ; Narayanan & Hegarty, 2002). On trouve une illustration dans les principes de conception pour le multimédia interactif de Mayer (2001 ; cf. Tableau 8).

Principes	Bénéfice attendu - effet sur l'apprentissage
Principe multimédia	Effet positif de la présence d'illustrations
Principe de contiguïté spatiale	Effet positif de la proximité physique des sources d'informations visuelles
Principe de contiguïté temporelle	Effet positif de la proximité temporelle des sources d'informations visuelles et orales
Principe de modalité	Effet positif de l'utilisation de la modalité orale pour expliquer une source d'information visuelle.
Principe de cohérence	Effet positif de la suppression d'informations non pertinentes pour l'apprentissage (détails, musique, etc.).
Principe de redondance	L'utilisation d'informations redondantes dans des modalités différentes peut avoir un effet négatif sur l'apprentissage
Principe des différences interindividuelles	Ces principes sont liés à des aptitudes qui varient d'un individu à l'autre.

Tableau 8. Exemples de principes de conception à respecter dans l'élaboration de documents explicatifs multimédias, ceux de Mayer, traduction de Jamet (2002).

A ma connaissance, il est rarement fait une distinction explicite, dans ces différentes sources, entre les principes et critères qui visent l'efficacité de l'apprentissage et ceux qui relèvent plutôt de l'objectif de faciliter l'utilisation et la manipulation de l'outil. Dans la majorité des cas, il s'agit plutôt de critères visant à favoriser l'apprentissage, avec la posture implicite que l'utilisabilité relève des critères usuels de l'ergonomie des logiciels. On trouve par exemple cette posture explicitement représentée dans la méthode d'évaluation du multimédia interactif proposée par Hu, Trigano et Crozat (2001).

5.3.1.3 Utilisabilité et apprentissage : une relation loin d'être claire

La question du rapport entre l'utilisabilité et l'efficacité de l'apprentissage (ou l'utilité au sens restreint dans le contexte des EIAH, voir Tricot et al., 2003) est aujourd'hui encore loin d'être claire dans le domaine des applications des technologies émergentes à la formation. Comme le notaient certains auteurs dès le milieu des années 1990 :

« Usability is typically conceived simply in terms of operating the software. There is no consideration of the implications of usability features for the use of the package to achieve educational goals. In this sense the integration of usability and educational issues is not considered. This leads to consideration of arbitrary usability features which may or may not be important to achieve educational goals. » (Squires & Preece, 1996).

J'ai indiqué ailleurs dans ce document (cf. chapitre 2, § 2.3.2 et chapitre 4, § 4.2.2.3 et suivants) l'apport mais aussi certaines faiblesses d'une approche centrée sur l'utilisabilité. A ce constat, d'ordre général, s'ajoutent des limites spécifiques liées au fait que le domaine d'application du dispositif soit l'apprentissage et la formation. J'en note deux qui me semblent majeures.

La première limite est que, dans le contexte d'outils pour la formation, le point d'intérêt se déplace de l'interaction binaire « utilisateur-système » vers une forme d'interaction plus complexe impliquant notamment la coopération didactique entre les apprenants et les formateurs, l'artefact constituant alors un moyen et une ressource pour cette activité à la fois individuelle et collective. La mesure de l'utilisabilité ne peut alors prendre la forme simple de la performance associée à l'atteinte d'un but par le sujet utilisateur-apprenant.

La seconde limite réside dans le fait que l'utilisabilité du dispositif et l'efficacité de l'apprentissage n'apparaissent pas corrélées selon une relation simple du type « meilleure est l'utilisabilité », meilleure est la performance du point de vue de l'efficacité pour l'apprentissage. La notion d'utilisabilité¹⁹ constitue en effet une association de plusieurs dimensions (facilité d'apprentissage,

¹⁹ Je n'entre pas ici dans une discussion sur la définition des dimensions ou des critères qui relèvent de l'utilisabilité, lesquels varient en largeur, niveau de détail et formalisation suivant les auteurs (voir par ex. Bastien & Scapin, 1993 ; Green, 1989 ; Nielsen, 1993). Par ailleurs, je retiens la définition classique de l'ISO9241-11 du point de vue de la définition en termes de mesure de performance : « 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 ».

mémorisation des commandes, prévention des erreurs, satisfaction...). Or, ces différentes dimensions n'ont pas les mêmes accointances avec la performance d'apprentissage. Par exemple, Boling et Robinson (1999) observent un niveau de satisfaction des apprenants inversement corrélé avec la performance d'apprentissage dans les trois situations qu'ils comparent : apprentissage individuel à partir de notes prise en cours, coopération induite par une consigne de travail en groupe, utilisation individuelle d'un logiciel multimédia interactif. En effet, la condition de coopération engendre de meilleurs résultats en termes d'apprentissage que la condition de travail individuel avec le multimédia interactif et la condition travail individuel. Par contre, les sujets ayant utilisé le multimédia interactif sont les plus satisfaits. Les moins satisfaits sont ceux ayant travaillé dans la situation de coopération. De même, des évaluations réalisées sur différentes configurations d'environnements virtuels pour l'apprentissage de la physique (Dede et al., 1996b) montrent, entre autres résultats, que l'ajout d'information selon plusieurs modalités sensorielles améliore l'apprentissage et la compréhension des concepts, par comparaison à la modalité visuelle seule. Mais dans le même temps, les sujets jugent que l'environnement virtuel est plus difficile à utiliser, i.e. est défaillant en termes d'utilisabilité.

Dans le contexte des technologies d'apprentissage, l'utilisabilité a parfois été analysée indirectement en terme de la charge cognitive plus ou moins importante qu'elle engendre pour le sujet quant à la manipulation et à la navigation au niveau de l'interface. Les **défauts d'utilisabilité conduisent en effet à mettre en compétition une telle charge de travail « extrinsèque » avec la charge de travail « essentielle »,** i.e. associée à l'apprentissage (processus d'inférences, d'élaboration de schémas etc.), du fait de la limitation des ressources du système cognitif humain. La théorie de la charge de travail (par ex. Sweller, 1994) est ainsi associée à l'explication des différences observées entre différentes situations d'apprentissage impliquant les nouvelles technologies. Cette théorie reçoit un grand nombre de confirmations empiriques obtenues dans le domaine de l'apprentissage au moyen de documents multimédias (voir par exemple le numéro spécial de la revue Learning and Instruction : Verhoeven, Schnitz, & Paas, 2009).

Certains résultats ne soutiennent toutefois pas entièrement cette hypothèse. Ainsi, un coût fort lié à l'utilisation peut s'accompagner d'une meilleure performance d'apprentissage pour plusieurs raisons, dont la seule analyse en termes d'utilisabilité ne permet pas de rendre compte. Par exemple, le coût lié à l'utilisation peut affecter les choix stratégiques de l'utilisateur. Par ailleurs, les processus cognitifs liés à l'utilisation et à l'exploration de l'information via le dispositif technique ne sont pas toujours indépendants des mécanismes de construction des connaissances. Par exemple, une étude a comparé deux interfaces associées au même logiciel de simulation pour l'enseignement de l'aménagement des ambiances lumineuses (Guttermann Schär, Stoll, & Krueger, 1997). Cette étude montre justement que l'interface avec un langage de commande induit de meilleurs résultats d'apprentissage que l'interface exploitant la métaphore de la manipulation directe. La raison invoquée réside dans l'induction d'une stratégie différente, laquelle a pour conséquence le développement d'une activité d'apprentissage différente entre les deux versions du simulateur. L'interface de manipulation directe, simple à utiliser, s'accompagne de beaucoup d'essais et erreurs, en même temps que les sujets passent moins de temps en réflexion entre chaque essai. Inversement, l'utilisation du langage de commande s'accompagne d'un moins grand nombre d'essais par tâche, et de plus de temps avant chaque nouvel essai. On peut ajouter que le langage de commande ayant un découpage en correspondance avec la méthode à acquérir, il est possible que l'apprentissage de l'utilisation participe alors de l'apprentissage du contenu. En d'autres termes, il se pourrait que dans cette étude, deux éléments concourent simultanément à une meilleure performance d'apprentissage dans l'étude de ces auteurs. D'une part, **la mauvaise utilisabilité engagerait le sujet à faire plus d'effort pour comprendre la tâche et l'organisation des actions dans la procédure à acquérir.** D'autre part, **la similarité entre les connaissances nécessaires à l'utilisation et les connaissances à acquérir impliquerait un transfert positif** de ce qui est acquis en termes de manipulation et d'utilisation (résultant de la charge extrinsèque) vers les connaissances cibles à acquérir (charge essentielle).

Pour certains auteurs (par ex. Johnson, 1981 ; Wickens, 1992) l'apprentissage nécessite un effort et un engagement de l'apprenant. La disposition d'interfaces graphiques, ou d'informations rendant la situation-problème plus simple à traiter, aurait pour effet de diminuer les efforts consentis par les apprenants. Johnson (1981) montre par exemple pour l'apprentissage d'une séquence procédurale, que les contraintes du dispositif d'apprentissage en termes d'accès plus ou moins restreint à l'information et au retour visuel, affectent significativement la mémorisation (rétention) et le transfert. En particulier, lorsqu'on ne permet pas aux apprenants d'avoir accès à tous les indices et les retours visuels habituellement présents dans la situation réelle, la tâche à réaliser devient plus complexe mais permet en retour un apprentissage plus durable et un meilleur transfert de la procédure ciblée. Ainsi une stratégie pédagogique qui impose à l'apprenant de construire ses propres indices et « feedbacks » accroît la rétention des compétences impliquées dans la mise en œuvre d'une procédure. Pour Wickens (1992), il existe un compromis entre la performance et l'apprentissage : l'amélioration de l'une se ferait au détriment de l'autre. Inversement, si les

informations ne sont pas directement ou complètement disponibles, cela requiert un effort plus important de la part de l'opérateur pour inférer et construire les relations sous-jacentes, aboutissant à développer une connaissance plus profonde sur le phénomène. D'autres auteurs suggèrent toutefois que si une interface et une assistance à la tâche peuvent en effet favoriser une tendance à développer une activité de traitement superficielle des informations, il ne semble pas toujours y avoir un réel compromis entre les deux. Notamment, les caractéristiques propres au sujet, en termes de motivation par exemple, influencent fortement la qualité et la profondeur de l'apprentissage effectivement réalisé (Christoffersen et al., 1998).

Enfin, des études déjà anciennes ont souligné que ce sont moins les propriétés - dont l'utilisabilité - que l'interaction entre les caractéristiques du sujet, la méthode, l'organisation du matériel et le domaine cible de la formation qui affectent l'efficacité de l'apprentissage (par ex. Bisseret & Enard, 1969-1970 ; Régnier & de Montmollin, 1968). Cette question est à nouveau discutée dans le contexte des technologies plus actuelles, par exemple la structuration des hypertextes (par ex. Tricot & Bastien, 1996).

Ces arguments sont à considérer pour certaines comme des réflexions, voire des pistes de recherches, plus que comme des résultats stables, répliqués et validés. Pour ma part, je pense que la dimension de l'utilisabilité – si elle a une certaine pertinence dans le cadre d'un usage expert – par exemple pour ce qui est du formateur ou de certains outils génériques pour les apprenants (par ex. index, thésaurus) devrait être considérée avec plus de précautions dans le champ des technologies pour la formation et l'apprentissage, et plus généralement lorsqu'il s'agit de soutenir le développement et le maintien des compétences. En particulier, il serait important d'élargir l'investigation aux différentes sous-dimensions qui composent l'utilisabilité en lien avec la performance d'apprentissage – plutôt que de considérer l'utilisabilité sous l'angle d'une dimension unique. De même, les situations et les intervalles de temps mis en œuvre dans les études gagneraient à être plus proches des situations de formation ou d'apprentissage ciblées. Enfin, là encore il convient de résister l'utilisabilité comme un critère parmi d'autres de l'ergonomie (Burkhardt & Sperandio, 2004). L'interaction devrait être conçue dans l'optique de servir l'apprentissage, i.e. de maximiser l'impact en termes d'apprentissage en jouant sur des facteurs comme le transfert positif, la motivation etc. et non de cibler la seule facilité d'utilisation.

5.3.2 Les approches spécifiques à l'activité et au projet considéré

L'analyse systématique des caractéristiques des apprenants, de la situation actuelle et de formation ciblée constituent une adaptation de l'approche centrée-utilisateur au contexte de la conception d'un artefact technologique dédié à la formation et à l'apprentissage. L'ergonomie développe plusieurs axes importants de travaux et de contributions dans cette direction. On y retrouve les approches associées à la pratique de l'analyse de l'activité pour la formation telles qu'évoquées dans le chapitre 2 de ce document (voir notamment § 2.3.3). Ces analyses visent généralement à appréhender l'expertise ou l'activité des personnes concernées par la formation.

5.3.2.1 Analyses de l'activité orientée vers l'identification de difficultés d'apprentissage

Outre l'objectif de compréhension et de description de l'activité développée dans la situation de formation, un second intérêt de l'analyse du travail dans ces situations réside dans **l'identification des difficultés d'apprentissage**. Analyser l'activité en situation de formation (qu'elle soit officielle ou informelle) fournit en effet l'opportunité d'observation de telles difficultés, dans la mesure où c'est essentiellement dans ces situations de transmission que de nombreuses difficultés d'apprentissage peuvent être mises en évidence. La notion de difficulté d'apprentissage est à prendre au sens de difficultés ou d'obstacles rencontrés par l'apprenant à certaines étapes de son apprentissage, plutôt qu'au sens de handicap (learning disabilities) de la littérature anglo-saxonne. Ces difficultés peuvent être de plusieurs ordres et ne sont pas mutuellement exclusives. Elles peuvent avoir une origine interne, spécifique à l'apprenant, du fait des rapports complexes entre le développement de sa pensée et les savoirs à acquérir. Elles peuvent aussi avoir une origine sociale (par ex. relations aux autres apprenants, aux formateurs/professeurs, au contexte d'apprentissage, culture).

Plusieurs registres ou composantes coexistent dans les difficultés d'apprentissage. Les obstacles (ou difficultés) à l'apprentissage peuvent par exemple s'inscrire dans un registre didactique, faisant ainsi référence à ce en quoi le savoir (pratique ou théorique) à acquérir comporte intrinsèquement des obstacles et des sources potentielles de difficultés. Les difficultés peuvent également provenir de la complexité de la tâche que l'apprenant se voit assigner, par exemple s'il ne maîtrise pas la procédure requise – même en ayant correctement identifié le problème. La complexité de la tâche peut aussi entraîner une surcharge cognitive conduisant l'apprenant à en omettre une partie par oubli ou du fait d'une grande difficulté à partager son attention. L'apprenant peut aussi ne pas disposer à cet instant des outils cognitifs et logiques pour traiter la situation. Ainsi, la difficulté peut provenir des opérations logiques de la pensée qu'il est

nécessaire de mobiliser au cours de la tâche d'apprentissage : identifier, ranger, classer, mettre en correspondance, comparer, déduire, etc. Les obstacles peuvent être liés à sa capacité à traiter de l'information, telle que sélectionner les données et les sources utiles, planifier les différentes étapes de l'activité à venir, utiliser les données en mémoire, mobiliser son attention, ou encore contrôler la validité de ce qui est obtenu à l'issue de la tâche. Enfin, il peut aussi y avoir une composante langagière, renvoyant aux difficultés éventuelles de compréhension au sens large : les énoncés fournis, la question posée, le vocabulaire utilisé etc. Certaines propriétés de la situation de formation elle-même, voire l'interaction entre ces propriétés et les caractéristiques de l'apprenant, peuvent aussi être à l'origine de difficultés d'apprentissage : par exemple l'usage d'une méthode pédagogique inadéquate relativement à l'âge de la population, un faible recouvrement entre le contenu à acquérir et l'activité réelle, une densité d'objectifs d'acquisition et des contraintes temporelles fortes, l'absence de feedback pour les formateurs concernant l'acquisition effective par les participants (par ex. Cau-Bareille, Delgoulet, & Gaudart, 2006).

5.3.2.2 Analyses centrées sur l'activité de l'enseignant, du formateur ou sur l'interaction didactique

Il existe peu d'études publiées, en ergonomie, focalisées spécifiquement sur l'activité des formateurs et/ou des enseignants, voire l'interaction apprenant-formateur. Ces travaux sont plutôt récents, traitant des aspects et des dimensions variés, comme l'activité de l'enseignant en classe dans le domaine des mathématiques (par ex. Rogalski, 2003) ou de la philosophie (Yvon & Clot, 2003), l'activité de tutorat (Chi, Siler, Jeong, Yamauchi, & Haussman, 2001), les différentes dimensions des activités d'apprentissage en situation de tutorat dans la maintenance ferroviaire en lien avec l'expérience (Delgoulet, 2001), l'appropriation d'enseignants en aménagement paysager en lycée (Veyrac & Asloum, 2009).

5.3.2.3 Evaluations des maquettes et des prototypes

Au cours puis à l'issue de la conception, les études empiriques menées sont plus directement liées à l'évaluation d'hypothèses spécifiques à partir des maquettes et des prototypes produits. Les méthodes et techniques, en phase avec la conception, sont largement décrites et formalisées dans la littérature sur la conception centrée-utilisateurs (par ex. Maguire, 2001). On trouve de surcroît dans des sources récentes une discussion sur les difficultés et les spécificités de l'évaluation dans le contexte spécifique des EIAH (par ex. Bétrancourt, 2007 ; Burkhardt, Lourdeaux et al., 2006 ; Jamet, 2006 ; Tricot, 2007). In fine, l'évaluation du produit et des usages développés sur le terrain constitue une continuation de la conception, à la fois en engageant un retour réflexif sur la trajectoire et les résultats du projet « en cours d'appropriation » en même temps qu'une base d'apprentissage à exploiter pour d'autres épisodes de conception à venir.

5.4 Etudes menées dans le champ de la conception de technologies pour la formation et l'apprentissage (contributions empiriques)

Cette partie présente quelques-unes des études menées dans le contexte ou à propos de la conception de technologies pour la formation et l'apprentissage. Trois axes principaux se distinguent : des études portant sur l'existant, des études centrées sur l'apprenant et des études centrées sur l'activité de l'enseignant, du formateur ou sur l'interaction didactique.

5.4.1 Une étude systématique de l'existant dans les environnements virtuels pour la formation

Même si les travaux et les synthèses récents offrent certaines clefs théoriques ou méthodologiques pour une conception ergonomique des environnements virtuels pour la formation (par ex. Burkhardt, Lourdeaux et al., 2006 ; Burkhardt, Lourdeaux et al., 2003), une approche complémentaire pour enrichir la conception réside dans l'étude comparative des dispositifs existants (Kieras, 1997). J'ai adopté cette perspective dans une recherche (Burkhardt, Lourdeaux et al., 2005) afin de contribuer à doter le domaine des EVA d'une certaine formalisation des usages et des configurations de dispositifs utilisés qui soit exploitable pour la conception. Outre que cette formalisation n'existe pas en 2005, l'originalité de notre approche a consisté à croiser trois dimensions : (1) le domaine, renvoyant à la nature des compétences et connaissances à acquérir ciblée par la formation avec l'EVA ; (2) le domaine pédagogique renvoyant aux fonctions et à la configuration formateur/formé où prend place l'exploitation de l'EV ; (3) les choix techniques décrivant l'EV lui-même, notamment en ce qui concerne l'interaction avec un ou plusieurs utilisateurs.

Méthode. Les données ont été recueillies entre janvier 2004 et juillet 2004 dans le cadre du projet APLG (pour le détail des résultats et de la méthodologie, voir Burkhardt, Lourdeaux et al., 2005). L'étude a porté sur les caractéristiques de 17 Environnements Virtuels d'Apprentissage (Tableau 9) recensés au moyen d'une méthodologie par questionnaire, entretiens et examen des données issues de la littérature. Les participants ont été contactés au moyen des listes de diffusion ErgoIHM, Interactif et Reverie, ainsi que par envoi direct aux

interlocuteurs déjà identifiés. L'analyse a porté sur 11 variables correspondant au codage direct des réponses aux questions retenues, chacune ayant de 3 à 6 modalités. Ces variables ont été croisées deux à deux ; nous avons alors analysé les taux de liaison²⁰ et le V2 de Cramer²¹.

Dénomination	Formation concernée	Institution/ société
Robinet Virtuel	Diagnostic Dépannage sur robinets industriels (nucléaire)	EDF
Pont Polaire	Communication Gestuelle des Pontiers (nucléaire)	EDF
Simulation Phénomènes Physiques	Visualisation Compréhension des phénomènes physiques (nucléaire)	EDF
Projet RES Réacteur d'essai	Familiarisation avec un nouvel environnement/ nouveau bâtiment.	Pixys SA
EVICS	Formation préventeurs à la Prévention Risque Chimique	INRS
Projet Interactif - Syndrome d'Asperger	Habiletés Sociales	VIRART Univ. Nottingham
Formation à la Décision RV immersive	Formation Intervenants en premiers secours	Vrlab MIRALab Univ. Geneve
Simulateur Feux de Forêts	Commandement lutte contre feux de forêts.	EMI- Aix en Pce
Commandement pompiers	Commandement des pompiers	GVU Center Georgia Tech.
Concept d'Instruction à la Maintenance	Tâches de maintenance d'un char	GIAT/ Nexter Industries
MASCARET	Entraînement à la réalisation collaborative de procédures en environnement complexe	Brest - Centre Européen de Réalité Virtuelle
SécuRéVi	Formation à la gestion opérationnelle pour les officiers sapeurs-pompiers	Brest - Centre Européen de Réalité Virtuelle
GASPAR	Formation d'officiers à la gestion aviation sur porte-avions	Brest - Centre Européen de Réalité Virtuelle
EVE	Apprentissage collaboratif de la lecture aux enfants de CP	Brest - Centre Européen de Réalité Virtuelle
VTT	Apprentissage du processus d'usinage avec retour haptique	AFPA
WAVE	Apprentissage de la tenue et du déplacement de l'outil de soudage	AFPA
FIACRE/ SOFI	Formation des conducteurs de TGV à l'intervention sur voie	SNCF

Tableau 9. Liste des 17 environnements virtuels étudiés en 2004 (Burkhardt, Lourdeaux et al., 2005)

Les données recueillies ont mis en évidence des caractéristiques récurrentes des « usages » actuels en termes de configurations technologiques, des usages pédagogiques, des domaines de tâche ou des compétences à apprendre, des retours spécifiques sur l'expérience de cet usage. Plus généralement, l'analyse des liaisons entre les variables deux à deux montre des relations fortes entre certaines de leurs modalités respectives. L'exploitation complète de ces relations nous a permis de proposer quatre patrons récapitulatifs d'environnements virtuels. Ils sont brièvement présentés dans une section ultérieure (cf. ce chapitre, § 5.5.2). Trois principaux résultats sont évoqués à la suite (pour un exposé complet, voir Burkhardt, Lourdeaux et al., 2005).

5.4.1.1 Une place importante des formateurs dans les situations de formation avec environnement virtuel

Loin des Images d'Epinal de la Réalité Virtuelle, les configurations font une place importante au formateur et ciblent autant l'Apprentissage Individuel que Collectif. En effet, l'image médiatique classique de la Réalité Virtuelle (des Nouvelles Technologies généralement) pour l'apprentissage comme outil pour l'autoformation est d'emblée battue en brèche. Les situations pédagogiques réelles (ou prévues dans le cas de projet en cours) impliquent en effet un formateur dans presque tous les cas sauf un. Côté apprenant, les systèmes se répartissent approximativement par moitié entre ceux où un apprenant individuel est concerné et ceux

²⁰ Les taux de liaison (TDL) sont des écarts relatifs à l'indépendance. Ils s'obtiennent par la comparaison entre les données observées et celles qui auraient été obtenus si les deux facteurs étudiés étaient indépendants. Il y a attraction lorsque le taux de liaison est positif (les données observées sont supérieures à celles théoriques).

²¹ Le V2 de Cramer se calcule à l'aide du phi 2 divisé par le phi 2 max. Phi 2 max est la plus petite dimension du tableau moins 1. Phi 2 est le résumé, la moyenne des taux de liaison du tableau. Le V2 de Cramer est lié aux valeurs des taux de liaison ainsi qu'à la taille du tableau. Compris entre 0 et 1, la liaison est considérée forte pour $V2 > 0.16$, faible pour $V2 < 0.04$, intermédiaire entre les deux.

s'adressant à un collectif d'apprenants. Le nombre d'apprenants varie de 2 à 20 stagiaires ; parmi ces systèmes, la moitié s'adresse à un groupe compris entre 7 et 12 apprenants. Deux configurations sociotechniques sont ainsi plus fréquentes. La première se décrit du point de vue pédagogique par la présence d'un formateur et de plusieurs apprenants et, du point de vue de l'implantation, par plusieurs postes. La seconde correspond aux situations de tutorat en monoposte. Un autre aspect des stéréotypes attachés à la Réalité virtuelle concerne la dimension multisensorielle des stimulations créées virtuellement. On imagine en effet souvent l'immersion d'un apprenant s'appuyant à la fois sur l'image, le retour d'effort et le toucher, le son - si possible spatialisés. Or d'une part environ 1/4 des EV exploite uniquement la modalité visuelle en sortie. D'autre part, parmi les autres, l'usage de deux modalités visuelle et sonore prédomine. Ainsi, la combinaison vision, son et haptique, reste l'exception plutôt que la règle.

5.4.1.2 Enrichir les possibilités de la simulation comme rationalité principale pour la conception

Les rationalités de la conception sont multiples et complémentaires, en grande partie analogues à celles avancées pour le recours à la simulation en formation (par ex. mettre en situation quand la situation réelle ne le permet pas, pour des raisons de coût, pour des raisons de sécurité pour soi ou autrui, ou encore du fait de la rareté de la situation ; segmenter l'apprentissage en étapes ou en modules) ; viennent s'y rajouter néanmoins plusieurs points spécifiques :

- l'ajout ou la superposition d'informations sous différentes formes, par ex. la démonstration des tâches à effectuer, l'assistance à la demande ;
- la commande/réalisation symbolique des actions non directement pertinentes pour les objectifs d'apprentissage ciblés, actions dont la réalisation effective n'est pas demandée à l'apprenant ;
- la possibilité d'intégrer des phénomènes impossibles à représenter dans la réalité.

5.4.1.3 L'erreur, le guidage et les rétroactions : des thèmes en cours d'émergence

La posture vis-à-vis de l'erreur est variée et reste traitée de façon peu explicite dans la grande majorité des environnements, alors qu'il s'agit d'un point central dans un processus d'apprentissage. L'analyse nous a fait suggérer deux dimensions de démarcation entre les systèmes :

- quant au fait de laisser ou non faire des erreurs. La stratégie adoptée est variable, même à l'intérieur d'un même environnement. Selon le cas, le guidage et les possibilités d'actions sont tels que seules les actions autorisées sont réalisables. D'autres délivrent immédiatement un « message d'erreur » dès lors qu'une action non autorisée est tentée. Enfin d'autres encore, éventuellement suivant le choix du formateur, laissent l'apprenant s'engager dans un cheminement erroné. Cette stratégie peut parfois être adaptée en temps réel par le formateur, et n'est donc pas systématiquement préprogrammée. Des choix didactiques ou pédagogiques a priori peuvent amener à traiter différemment l'erreur suivant son type. Enfin, les erreurs peuvent également être traitées par le formateur sans passer par le système, par exemple, au moment du débriefing lorsque le formateur fait réfléchir verbalement les stagiaires sur leurs erreurs pour les amener à trouver des solutions.
- quant aux conséquences de l'erreur sur la poursuite de la tâche - exercice en cours. Les stratégies adoptées diffèrent également. Dans certains cas, les apprenants doivent recommencer jusqu'à ce que leur décision d'action soit adaptée à la situation. Dans d'autres, l'apprenant peut faire des erreurs, mais s'il atteint un certain taux d'erreur, il doit revenir à une phase précédente de la formation. Enfin, c'est parfois le formateur qui intervient par l'intermédiaire d'un avatar pour aider l'apprenant.

L'étude s'est aussi intéressée à deux éléments d'assistance centraux dans le domaine de l'apprentissage et des technologies pour l'apprentissage : le guidage et les rétroactions. Des fonctions de guidage (par ex. démonstration des tâches à effectuer, reproduction guidée de la tâche, assistance à la demande) étaient présentes dans plus de la moitié des environnements virtuels de notre échantillon, l'analyse mettant en évidence des relations fortes avec les objectifs d'apprentissage et la configuration pédagogique retenue. Concernant les rétroactions (feedbacks) vers l'apprenant, les stratégies apparaissent là encore variées. De même que pour l'erreur, les principes et questions liés aux rétroactions sont peu abordées. La plupart des EVA utilisent des rétroactions. Un peu moins d'1/3 utilise les seules rétroactions d'interaction, c'est-à-dire des rétroactions visant à renseigner l'apprenant sur la prise en compte de son action par le système, ce qui renvoie à l'acception classique de la notion de rétroaction dans le domaine de l'ergonomie des logiciels (« feedback d'interaction »). Le cas le plus fréquent est cependant la combinaison de rétroactions d'interaction et d'apprentissage, ces deuxièmes renvoyant aux informations choisies spécifiquement pour avoir un effet sur l'apprentissage (rétroaction - feedback d'apprentissage). Il en existe divers types (Burkhardt, Lourdeaux et al., 2003) :

- rétroactions **correctives**, suite à une erreur de l'apprenant,
- rétroactions **positives**, délivrées suite au succès dans la réalisation d'actions ou le franchissement d'étapes considérées comme importantes dans le cadre de la progression de l'apprentissage,

- rétroactions de guidage ayant pour objectif de guider l'apprenant dans la réalisation de la tâche qu'il est en train d'effectuer.

5.4.2 Etudes centrées sur l'apprenant et l'apprentissage

5.4.2.1 Analyse du besoin dans le contexte de l'introduction d'une technologie émergente pour la formation

L'étude a été menée auprès de techniciens en garage (Anastassova, 2003 ; Anastassova, Burkhardt, Mégard, & Ehanno, 2005) dans le contexte d'un projet de développement des technologies de la réalité augmentée pour la formation des opérateurs de la maintenance de véhicules automobile. La demande initiale portait sur l'analyse des difficultés des techniciens de maintenance et des besoins de formation, du fait notamment de l'évolution des modèles et des technologies présentes sur les nouveaux véhicules. La Réalité Augmentée (RA) offrant à l'utilisateur des fonctions d'accès et de présentation contextuelle de l'information « *in situ* », l'hypothèse de l'équipe de conception était d'identifier les contraintes et les spécifications ergonomiques pour un tel outil de RA devant permettre l'assistance et la formation des techniciens sur site.

Méthodologie. L'étude a consisté en l'observation ouverte de techniciens en formation (42h/6j) et en atelier (62h/9j) pour appréhender le métier, puis en un recueil de difficultés relatives à la maintenance sur les nouveaux modèles au moyen d'entretiens individuels semi-dirigés avec la technique des Incidents Critiques. 11 mécaniciens répartis selon deux niveaux de qualification ont participé à cette étude et ont produit la description de 81 Incidents Critiques. Le contenu des incidents a ensuite été transcrit puis codé au moyen d'une analyse de contenu fondée sur plusieurs catégories d'indicateurs (panne perçue comme difficile vs. simple à résoudre ; Incident résolu vs. non résolu ; composant impliqué : mécanique vs. électrique vs. électronique, non clairement identifié ; degré de nouveauté des véhicules impliqués : récents vs. très récents ; type d'activité concernée : réparation vs. diagnostic ; facteurs critiques explicités en premier), certaines catégories d'indicateurs étant d'ailleurs re-décomposées (pour plus de détail, voir Anastassova, Burkhardt, Mégard, & Ehanno, 2005).

Les résultats ont montré que l'activité de diagnostic est majoritairement évoquée dans les incidents critiques (80% des cas), quel que soit le niveau de qualification du technicien. Les problèmes ayant donné lieu à une performance défaillante sont essentiellement liés à des composants électroniques, ou encore à des situations de pannes où l'origine n'a pu être identifiée. Le jugement de difficulté d'une situation de maintenance est associé à deux facteurs principaux : l'estimation d'un déficit de formation sur le type de problème rencontré, d'une part, et la non-reproductibilité ou l'aléa du symptôme décrit d'autre part. De plus, les outils d'aide au diagnostic ont un rôle contrasté sur la survenue des difficultés recueillies : un tiers des incidents impliquent l'usage des outils d'aides au diagnostic ou l'accès à l'information pertinente en ligne (« *hot line* ») et dans quasiment tous les cas ils engendrent une performance de maintenance défaillante. Précisons que par défaillante, il faut entendre un engagement en temps, immobilisation du véhicule, actions etc. supérieurs à ceux prescrits, et non pas le fait que la maintenance n'ait pas été effectuée. Une illustration est par exemple le démontage complet et l'immobilisation de plusieurs jours d'un véhicule en raison d'une référence de panne identifiée à tort par le logiciel non à jour pour le véhicule concerné.

Pour finir, la structure sous-jacente liant les dimensions explicitées dans ces incidents critiques a pu être mise en évidence au moyen des techniques d'analyse multidimensionnelle des données. Ainsi, une analyse des correspondances sur la base des variables codées dans les incidents met en évidence deux dimensions (80% variance expliquée) : la première traduit l'opposition entre deux types de difficultés : celles qui sont liées au diagnostic, à l'absence de symptôme, à la non-identification des composants impliqués, et celles qui sont liées non à la difficulté du diagnostic mais à la difficulté d'opération de la maintenance. Le deuxième axe met en évidence un effet de la récence du modèle de véhicule impliqué sur la difficulté de l'activité : elle met en évidence d'un côté que les réparations et les diagnostics les plus difficiles sont associés aux modèles les plus récents, tandis que les réparations jugées les plus faciles sont celles associées aux véhicules plus anciens. Dans cette étude, les modèles considérés comme récents étaient ceux ayant moins de deux ans. Les modèles plus anciens avaient entre 2 et 4 ans. (Figure 17).

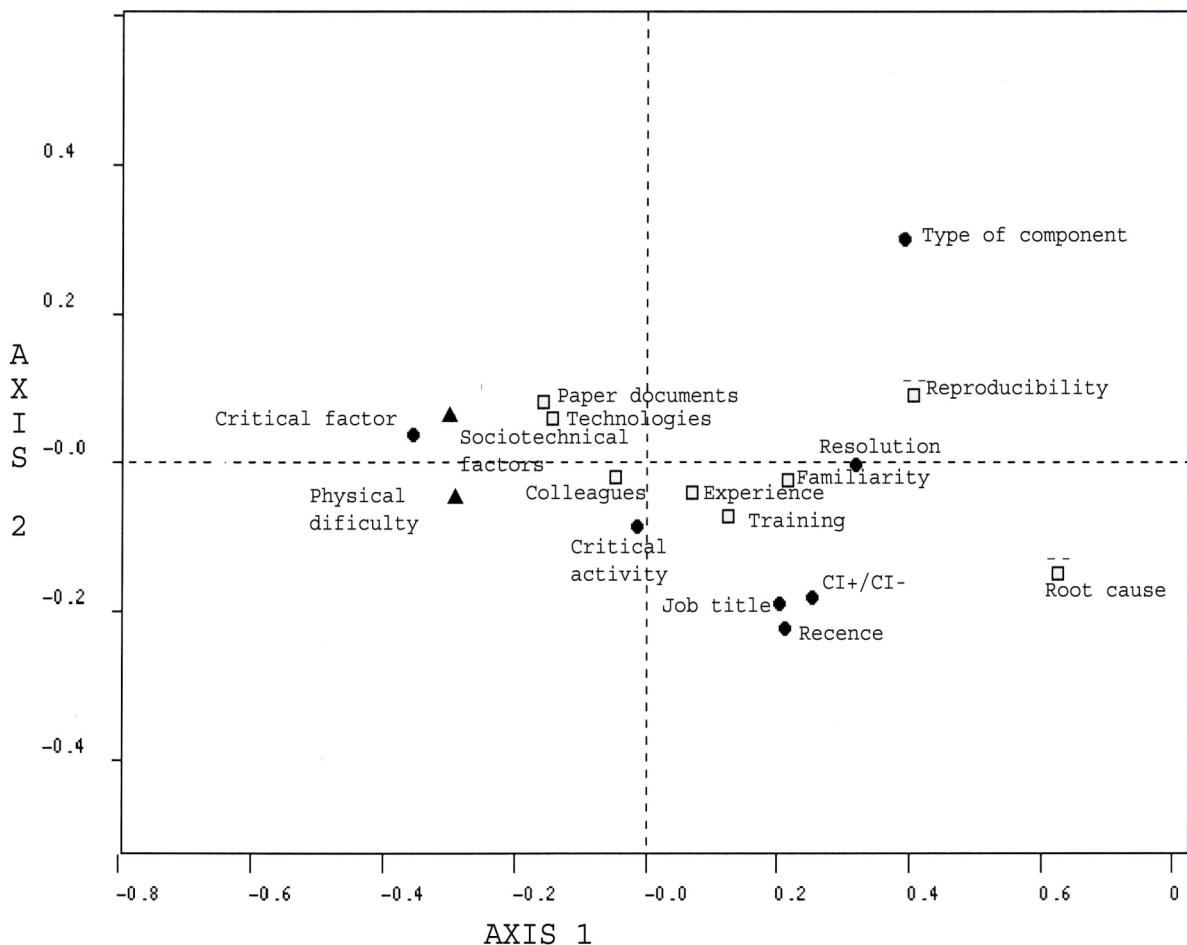


Figure 17. Représentation graphique des résultats de l'analyse des correspondances (d'après Anastassova, Burkhardt, Mégard, & Ehanno, 2005)

5.4.2.2 Analyse de l'expertise et de l'activité en vue de construire la situation de formation

L'étude de l'activité d'opérateurs en situation de travail constitue l'un des fondements pour définir les objectifs, la méthode et le contenu de la formation. L'intérêt de ces études est double : sur le plan pratique, elles fournissent une base pour l'environnement d'apprentissage envisagé. Sur le plan de la recherche, elles offrent l'opportunité d'étudier des activités en situation réelles et d'interroger les modèles et les représentations a priori sur ces activités. Ainsi des activités que l'on pense à priori similaires dans un contexte d'informatisation et de formation avec les nouvelles technologies peuvent se révéler extrêmement différentes sur le plan des exigences et des mécanismes cognitifs qu'elles impliquent.

Plusieurs de mes études entrent dans cette orientation : étude de l'activité et des difficultés de techniciens de maintenance automobile dans le cadre du Master recherche de M. Anastassova (Anastassova, 2003 ; Anastassova, Burkhardt, Mégard, & Ehanno, 2005) ; entretiens et recueils d'incidents auprès des intervenants dans des situations d'urgence dans le cadre du projet SAGECE (Girard et al., 2009), analyse de l'activité de chargement de conducteurs de matières dangereuses sur un site Seveso dans le cadre du projet V3S (Burkhardt et al., 2007 ; Burkhardt, Girard et al., 2008 ; Burkhardt, Girard et al., 2009), analyse de l'activité et des difficultés dans l'organisation et la réalisation d'une tournée de maintenance industrielle dans le cadre du projet PERF RV2 (Couix & Burkhardt, 2007).

5.4.2.3 Analyse de l'activité d'utilisation d'un prototype de réalité augmentée pour l'apprentissage de procédure

Dans cette étude (Anastassova et al., 2006), il s'agissait entre autres d'évaluer l'utilité et l'utilisabilité d'un prototype de Réalité Augmentée devant assister des techniciens de maintenance de trains novices dans la réalisation de leurs tâches. Le système affichait et annotait certaines parties cachées et visibles d'un transformateur électrique réel. Dans ce cas, l'avantage principal envisagé par rapport à une procédure en

papier était la réduction du nombre d'erreurs et du temps de recherche et de traitement de l'information, grâce à la présentation de consignes contextualisées en temps réel, au moment et à l'endroit approprié.

Méthode. 10 sujets ont été répartis aléatoirement en deux groupes selon le guidage utilisé : le premier groupe ne dispose que d'instructions en papier, tandis que le deuxième utilise le prototype de RA afin de réaliser la tâche assignée. La tâche à réaliser consiste en le démontage de la partie latérale et du câblage d'un transformateur électrique présenté par une maquette à taille réelle. Les données recueillies sont issues, d'une part, des enregistrements vidéo des passations individuelles et, d'autre part, des entretiens post-expérimentaux retranscrits verbatim et analysés.

Les résultats ont montré une supériorité de la condition papier sur la condition avec le prototype de Réalité Augmentée au niveau des indicateurs comportementaux utilisés, notamment le temps de réalisation de la tâche et le nombre d'erreurs. Bien qu'informatifs, ces indicateurs étaient cependant insuffisants dans un objectif d'évaluation formative et d'aide à la re-conception du dispositif. Inversement, l'analyse détaillée et qualitative des stratégies d'utilisation et des difficultés rencontrées par chaque utilisateur a permis une évaluation des caractéristiques d'utilité, c'est-à-dire d'adéquation des fonctions aux besoins réels, ainsi que l'orientation de la conception vers une exploitation plus efficace des potentialités offertes par la Réalité Augmentée. Cela a permis un meilleur choix des tâches à implémenter dans les prototypes, une exploitation plus efficace des caractéristiques des objets physiques dans l'environnement ainsi qu'une modélisation plus adéquate des objets virtuels utilisés.

5.4.3 Etudes centrées sur l'activité de l'enseignant, du formateur ou sur l'interaction didactique

5.4.3.1 Etude comparative de l'activité du directeur d'exercice au cours d'une simulation dans deux configurations contrastées de terrain

Une étude réalisée sous ma direction dans le cadre d'un master 2 recherche a porté sur l'activité de supervision d'exercices dans le cadre de formations au moyen de la simulation (Arab, 2004). Il s'est agi en particulier d'apporter des éclaircissements sur l'activité du directeur d'exercice (DIREX) lors du suivi d'exercices en simulation, tout en identifiant les spécificités liées à la complexité spatiale de l'exercice.

Méthode. Deux exercices d'une durée de 10h environ chacun ont été ainsi comparés : l'un se déroule en zone urbaine (3D) et l'autre en zone périurbaine (2D). Le premier a impliqué 11 stagiaires et plus un rôle simulé, le second également 11 participants et 6 rôles simulés. Pour chacun, la partie à proprement parler du combat représentait un peu plus de 4h. L'analyse a porté sur les communications et les interactions du DIREX avec les différents participants (y compris compères de la simulation) tout au long de ces 4 heures. Nous avons adopté comme cadre d'analyse celui proposé par Samurçay et Rogalski (1998) selon lequel l'activité de l'instructeur en simulation consiste à gérer un environnement dynamique.

Les résultats de cette étude mettent en évidence les catégories de l'activité de DIREX décrites par Samurçay & Rogalski (1998) : la gestion didactique de la séance, la gestion de la simulation et la gestion de son activité propre. Le rôle de joueur est cependant un aspect supplémentaire à prendre en compte, constituant à la fois une contrainte mais aussi un moyen d'agir tout au long de la simulation pour le formateur. Le DIREX est à l'origine de la majorité des échanges. Les échanges impliquent les stagiaires dans environ la moitié des cas. La seconde catégorie d'échanges la plus importante concerne les compères situés dans la même pièce. Ces deux catégories se retrouvent dans les mêmes proportions quelle que soit la complexité spatiale du combat simulé (3D vs. 2D). Un quart des échanges correspond à un recueil d'information sur les actions en cours ou sur l'état de la situation, c'est-à-dire correspond à des échanges non planifiés par le DIREX. Ces derniers échanges interviennent en moyenne toutes les 7,5 minutes (combat 2D) ou 3,5 minutes (combat 3D), obligeant ainsi le DIREX à organiser sans cesse son travail et à gérer ces interruptions. Cette étude nous a permis également de mettre à jour l'effet potentiel de la complexité du terrain sur l'activité de combat, d'une part, et par rebond sur l'animation de la simulation qu'elle implique. En combat 2D, le DIREX communique plus avec ses compères, et réalise également beaucoup d'échanges au titre d'un rôle qu'il simule. Les échanges d'information impliquant le DIREX sont plus fréquents en 2D qu'en 3D, mais sont par contre plus longs et impliquent plus de tours de paroles dans le cas du 3D. De plus, la fréquence des échanges s'avère élevée et constante tout au long de l'exercice 3 D, alors qu'elle varie fortement selon les phases du combat en 2D, allant de passages intenses à des moments très calmes. Les données analysées montrent que la proportion relative des différents types d'échanges diffère peu selon la nature du terrain, à ce près qu'en combat 3D, le mode d'échanges privilégié pour les informations de localisation est la position absolue, tandis que le recours aux positions relatives est privilégié dans le cas du terrain 2D. Ce dernier point est en cohérence avec le fait que dans le cas du combat 3D, le DIREX utilise plus souvent la carte Papier, plus précise et plus flexible (23%) que dans le cas du 2D (2,4%) où la représentation à l'écran est alors majoritairement utilisée. La nature de l'espace de

combat joue donc de façon importante sur le besoin en termes de précision, comme sur le besoin en termes de fréquence de mise à jour de ces informations. Cette étude a évidemment une portée limitée, par le fait que seuls deux scénarios et deux DIREX ont été analysés. Il s'agit donc d'une première approche exploratoire dans un domaine où il existe peu de littérature sur l'activité réelle des formateurs impliqués (pour plus de détails, voir Arab, 2004).

5.4.3.2 Impact des technologies sur l'activité des formateurs : animation d'une formation traditionnelle vs. d'une session en autoformation

Un autre exemple d'études, menée également dans le cadre d'une recherche réalisée en master 1 sur un terrain d'entreprise réel (Mérritte, 2002), a comparé l'activité de formateurs entre des situations de formation traditionnelle et des situations d'animation en groupe d'autoformation dans un département formation d'une entreprise informatique. La formation ciblée concernait les logiciels de bureautique.

Méthode. L'étude a consisté en l'observation de l'activité développée par 3 formateurs en situation réelle de formation avec des groupes allant de 2 à 4 stagiaires. Les formateurs disposaient tous du même matériel. 3 sessions d'autoformation d'une demi-journée (chacune durait entre 3h et 3h30) et trois demi-journées à l'intérieur de sessions de formation traditionnelles (chacune durant environ une journée) ont été enregistrées. L'analyse a porté sur les actions et les interactions verbales du formateur avec les stagiaires. Les activités des formateurs ont été catégorisées suivant les ressources mobilisées, mais également selon la centration sur le collectif (l'ensemble des participants) ou la centration individuelle (par ex. explique ou vérifie le travail d'un stagiaire en particulier).

Les résultats ont montré un effet sur l'activité d'animation entre la situation de formation traditionnelle et les situations d'animation en groupe d'autoformation. En formation traditionnelle, on observe certaines activités spécifiques: en particulier, les explications collectives (avec ou sans l'aide de l'ordinateur) ainsi que le recours aux questions pour faire découvrir une manipulation. En situation d'autoformation, il apparaît une proportion plus importante d'explications individuelles, d'intervention sur le poste d'un stagiaire et de questions posées dans le but de vérifier la compréhension. De façon intéressante, la proportion d'activité d'explication est similaire quelle que soit la situation d'autoformation ou en formation traditionnelle. Les résultats montrent que la situation traditionnelle engendre un panel d'activité plus riche et plus varié que la situation d'autoformation : les activités observées en autoformation existent aussi en formation traditionnelle, alors que l'inverse n'est pas vrai. Très logiquement, on trouve aussi que les activités du formateur sont en proportion plus orientées vers le groupe en formation traditionnelle, alors que sont privilégiées les activités centrées sur l'individu en autoformation. Enfin, de façon étonnante, on a pu constater que l'initiative de l'interaction (stagiaire vs. formateur) ne diffère pas suivant que l'on se situe dans la situation d'autoformation ou de formation traditionnelle. Que l'on soit en formation ou en autoformation, c'est le formateur qui reste majoritairement à l'initiative du déroulement de sa propre activité. Ce travail est cependant à considérer comme une étude parmi d'autres de l'activité des formateurs, en tenant compte des limites liées au choix du terrain, au faible échantillon de formateurs comme des sessions observées et à leur contenu ciblant les nouvelles technologies. Plus d'études sont nécessaires pour mieux connaître et comprendre cette activité et ses exigences, ainsi que clarifier les hypothèses parfois fortes faites sur la réalité de l'activité selon telle ou telle forme d'organisation pédagogique.

5.4.3.3 Interactions apprenant-formateur dans l'apprentissage de l'outil informatique

Dans le cadre d'autres travaux de recherche de Master 1, nous avons par exemple étudié la nature et la dynamique des interactions formateur/apprenants à trois moments d'une formation à l'informatique (Debeugny & Burkhardt, 2003).

Méthode. L'analyse a porté sur l'enregistrement de trois séances extraites parmi les 10 séances d'une formation réelle organisée dans le cadre du club du troisième âge d'une commune. Les apprenants étaient 7 femmes et 3 hommes inscrits volontairement à la formation (âge moyen = 67 ans). En plus d'un questionnaire, une analyse des protocoles (Ericson & Simon, 1993) a été appliquée sur le corpus des interactions « formateur/formés » recueillies au cours de ces trois sessions au moyen d'un enregistrement vidéo. La durée varie de 3h20 pour la séance de début, 3h15 pour la séance de milieu et 3h pour la séance de fin.

Les résultats ont permis de montrer la co-évolution de la nature, de l'objet et de la forme des interactions formateur/formé au fur et à mesure de l'avancée dans la formation. Les formés sont de plus en plus initiateurs de l'intervention d'aide, ils passent de demandes concrètes et ponctuelles à des demandes de procédures plus complexes en lien avec la tâche ou un objectif qui leur est personnel ; les demandes d'évaluation des formés deviennent aussi de plus en plus ciblées. Les interventions du formateur portaient tout d'abord sur l'utilisation du matériel et sur la tâche demandée par le formateur pour ensuite plutôt porter sur l'activité et les objectifs propres envisagés par le formé. Les stratégies d'aide adoptées par le formateur

diffèrent (encourager, expliquer, manipuler, faire manipuler, prescrire, montrer, questionner) selon l'objet de l'intervention, mais également en fonction de l'avancée dans la formation.

5.4.3.4 Conclusion

D'autres travaux sur l'activité des formateurs ont été menés dans d'autres contextes. Par exemple, nous avons travaillé sur l'usage des nouvelles technologies par les enseignants du primaire (Specht & Burkhardt, 2000 ; Specht, Burkhardt, & Sperandio, 1998). L'idée était d'évaluer l'utilisation des sites à destination des enseignants de primaire pour les aider à préparer leurs cours afin de déterminer les spécifications et la première maquette de site. Cette étude réalisée dans le cadre d'un contrat avec l'éditeur Nathan Multimédia, a donné lieu à des observations et des entretiens auprès d'enseignants volontaires, afin de délimiter les besoins fonctionnels, les attentes et les principaux facteurs susceptibles de favoriser ou au contraire inhiber l'utilisation de tels sites. L'un des intérêts de ce travail a été de se pencher sur ce versant de l'activité moins considéré que l'animation et le face-à-face pédagogique. Elle a été menée avec plusieurs collègues du laboratoire, en particulier M. Specht et J.-C. Sperandio. Enfin, la thèse de M. Anastassova, déjà évoquée, a porté sur l'analyse des situations de formation des techniciens de maintenance, en adoptant le cadre théorique des communautés de pratique. Certains des résultats ont été évoqués précédemment dans le cadre de l'apprentissage organisationnel (voir également Anastassova & Burkhardt, 2009). Plus récemment, j'ai abordé l'usage des TICE (technologies de l'Information et de la Communication pour l'Enseignement) par les enseignants de l'Université, dans le cadre de travaux de recherche en master co-encadrés avec C. Delgoulet.

5.5 Vers une méthode et des outils de conception des situations de formation avec les technologies émergentes centrée sur l'apprentissage (propositions méthodologiques)

L'ingénierie des EIAH est un chantier en développement depuis maintenant quelques années (Tchounikine, 2002a). Un travail important pour développer des méthodes et des modèles pour l'ingénierie de la conception des environnements virtuels en général est fait depuis dix ans (voir Fuchs & Burkhardt, 2003 ; Fuchs, Nashashibi, & Lourdeaux, 1999 ; Fuchs & Richir, 2006), et dans le champ des applications de formation en particulier (par ex. Burkhardt, Lourdeaux et al., 2003).

Le développement des artefacts pour la formation et l'apprentissage dans le contexte des technologies émergentes invite à faire évoluer les méthodes, les outils et la façon de considérer ces projets selon une approche ergonomique de conception centrée utilisateur adaptée au cadre de la formation (Burkhardt, Michel et al., 1998 ; Burkhardt & Wolff, 2002 ; Burkhardt, 2004b). On trouvera dans des publications récentes, la formalisation de différents aspects d'une telle approche centrée utilisateur spécifiquement liés au domaine des technologies et des ressources pour l'apprentissage et la formation. Ils peuvent consister en une liste de questions à se poser au moment de la conception (par ex. Tricot, 2007, pp 210-213), ou encore prendre la forme d'outils et de méthodes spécifiques pour préciser et assister la conception, dans le contexte de l'éducation et la formation (Burkhardt, 2002 ; Fischer, 2007 ; Good & Robertson, 2006 ; Lohr, 2000 ; Quinn & Wild, 1998). Good et Robertson (2006) proposent et discutent par exemple un cadre pour guider la conception dans le contexte du développement de technologies d'apprentissage avec des enfants délimitant, détaillant et articulant cinq composants : le contexte du projet en termes de types de contraintes à gérer, les activités à réaliser (recueil des spécifications, conception, évaluation), les rôles à l'intérieur du processus de conception à travers des profils différents, les catégories de partenaires entretenant des liens avec un projet et, enfin, les compétences requises pour chaque participant selon qu'il soit enfant ou adulte. L'accent est mis sur la participation des formateurs et des apprenants à la conception, non seulement au moment de l'évaluation et du prototypage mais aussi dès les premières phases (par ex. Druin, 2002 ; Scaife, Rogers, Aldrich, & Davies, 1997). Un élément remarquable est la remise en cause de deux postures implicites dans la conception de nombreux logiciels éducatifs qui sont : (a) la participation du seul formateur/enseignant comme porte-parole et représentant des apprenants, et (b) la considération du programme scolaire ou du référentiel métier comme englobant les besoins de l'apprenant.

Avec plusieurs collègues issus de l'ingénierie de la formation (D. Mellet d'Huart), de l'intelligence artificielle appliquée aux environnements virtuels d'apprentissage (D. Lourdeaux) et de l'ingénierie des applications industrielles de la réalité virtuelle (P. Fuchs), nous avons tenté depuis quelques années de proposer une approche intégrée pour la conception des situations de formation avec les technologies de la réalité virtuelle et augmentée. Ce travail de longue haleine, faisant le pont entre différentes disciplines, a donné lieu à plusieurs publications dont les chapitres sur la conception des environnements virtuels pour l'apprentissage (Burkhardt, Lourdeaux et al., 2003 & 2006), un chapitre discutant les approches actuelles notamment vis-à-

vis de la prise en compte des besoins des utilisateurs (Fuchs & Burkhardt, 2003), des articles et des chapitres plus directement reliés à l'ergonomie de la réalité virtuelle et aux approches centrées utilisateurs pour la conception de l'interaction (Burkhardt, 2003b ; Burkhardt, 2006b ; Burkhardt, Perron et al., 2006 ; Leva et al., 2006).

L'idée générale défendue est celle d'un ancrage très en amont des projets sur l'analyse du problème de formation à traiter ainsi qu'une insertion continue d'analyses sur et impliquant le terrain – en particulier au moyen de l'analyse de l'activité - tout au long d'un processus de conception spécifiquement développé pour le cadre des environnements virtuels (Fuchs et al., 1999 ; Fuchs & Richir, 2006). Une connaissance partagée des différents points de vue et instruments des différents métiers et disciplines impliqués dans ce contexte est un facteur également central du processus. La formalisation d'hypothèse et l'approche participative sont également des points qui nous ont semblé importants. Toutefois, ces différents points ne sont pas simples à mettre en œuvre dans ce type de projet exploitant des technologies émergentes, comme montré dans la partie précédente sur la conception (cf. chapitre 3, notamment § 3.4.2 et suivant). Aussi, des outils spécifiques ont été ou sont encore en cours de développement dans le but d'assister au mieux l'ensemble des participants de la conception, formateurs et futurs apprenants compris.

5.5.1 Une représentation pour la mise à plat de tous les « utilisateurs » concernés et des espaces possibles avant la conception

Un élément à considérer systématiquement est la double orientation fonctionnelle des outils et des technologies impliqués dans les situations d'apprentissage et de formation, du fait de l'existence de (au moins) deux catégories d'utilisateurs : d'une part les formateurs/enseignants, et d'autre part ceux qui apprennent avec ou au travers de l'utilisation du système. Les rôles et les dépendances entretenues avec d'autres intervenants (par ex.. administration de la formation) peuvent également avoir une répercussion importante sur l'ergonomie du système conçu, en l'absence de leur prise en compte dès l'étape de conception. En effet, l'activité, la nature des exigences et des assistances requises diffèrent suivant les acteurs en présence et les configurations considérées.

Il n'est pas toujours simple de rendre visible cet ensemble des acteurs potentiels et les conditions de leur interactions dans les situations visées dans un projet d'innovation technologique pour la formation. Les configurations sociotechniques possibles peuvent être résumées au travers d'un ensemble restreint de classes de situations. J'ai proposé de décrire ces classes au travers d'une matrice (Tableau 10) représentant les liens dans l'espace et dans le temps ainsi que les deux catégories d'acteurs impliquées : les apprenants (eux-mêmes entretenant différentes formes de relations entre pairs) et l'entourage des formateurs et des autres intervenants du processus de formation (Burkhardt, Michel et al., 1998 ; Burkhardt & Wolff, 2002). Outre le cadre social avec les pairs ainsi que les relations avec – et entre - les autres acteurs du processus d'apprentissage, la situation est caractérisable par la proximité et la nature des relations entre les différents acteurs à l'intérieur de cette configuration. La proximité caractérise une distance temporelle (synchrone vs asynchrone) en même temps que géographique (distribué vs local, voire mobile). Cet exemple vise à représenter l'espace des configurations sociotechniques possibles, afin d'en permettre l'exploration, et afin de préciser les hypothèses les plus probablement retenues. Cet outil s'appuie en outre sur des configurations typiques « traditionnelles » afin de faciliter le partage entre les acteurs et de les aider à extrapoler les (futurs) situations à instrumenter avec la technologie. Il est utilisable d'une part pour analyser l'existant et, d'autre part, pour analyser le contexte et délimiter la configuration dans laquelle vient s'inscrire un nouveau projet.

Espace des relations avec les pairs				Espace des relations avec les autres acteurs					
Appellation "classique"	Cadre social	Proximité spatiale	Proximité temporelle	Cadre social / acteurs pédagogiques	Proximité spatiale	Proximité temporelle			
Autoformation	Seul	Local/mobile	Simultané	Seul/ Formateur/ Expert/ Administration	Local/ Distribué	Simultané/ Désynchronisé			
Binôme	Binôme	Local/ Distribué	Simultané/ Désynchronisé						
Travail en groupe / équipe	Petit groupe								
Enseignement de masse	Grand groupe								

Tableau 10. Matrice de configurations socio-pédagogiques, spatiales et temporelles des situations de formation avec ou sans nouvelles technologies, adapté de (Burkhardt & Wolff, 2002)

Par ailleurs, l'intégration réelle des apprenants comme des acteurs à part entière du processus de conception, notamment en ce qui concerne la co-élaboration des besoins et des spécifications, est

également une évolution potentiellement bénéfique. Il en est de même des autres acteurs envisageables selon les situations possibles de l'espace de conception.

5.5.2 Des patrons pour ancrer les discussions en conception et limiter l'attirance vers des images d'Épinal

A partir de la mise en correspondance des relations constatées entre variables dans l'étude analysant l'existant (cf. 5.4.2.2), j'ai proposé quatre patrons principaux présentant les tendances observées pour la conception des Environnements Virtuels d'Apprentissage. Ces patrons renvoient chacun à une configuration sociotechnique et pédagogique de référence :

- le premier résume les propriétés d'environnements fondés sur le modèle du **tutorat** (Tableau 11) ;
- le second concerne les environnements virtuels conçus pour **l'activité en groupe supervisée** ;
- le troisième représente les environnements virtuels conçus comme des **supports de cours pour le formateur** dans le contexte d'animations en face-à-face ;
- le quatrième expose les propriétés d'un **environnement virtuel pour l'autoformation**.

L'objectif est de les exploiter dans le cadre de la conception en termes d'illustration et d'ancrage concrets pour la discussion sur des alternatives à envisager et à critiquer dans le contexte des phases initiales d'un projet. Ces premiers patrons constituent en effet un répertoire de solution-types à considérer selon plusieurs aspects (pédagogique, technique, ergonomique, économique, etc.) au cours de l'analyse du problème à traiter dans le cadre de la conception de tout nouvel environnement d'apprentissage. Pour les utilisateurs ou les concepteurs peu au fait des technologies de la réalité virtuelle, nous pensons qu'ils devraient permettre de limiter l'attirance « naturelle » des discussions vers les seules images d'Épinal de la Réalité Virtuelle, lesquelles sont restrictives et généralement peu productives. Enfin, en tant qu'exemples concrets, ils pourraient faciliter l'intercompréhension entre les différents métiers de la conception : technique, pédagogie, ergonomie. Sur le long terme, les patrons décrits aujourd'hui seront probablement modifiés, enrichis et éventuellement recomposés au fur et à mesure du recueil de données.

Je détaille à la suite le premier patron pour illustrer la démarche et l'outil (pour le détail des quatre patrons, voir Burkhardt, Lourdeaux et al., 2005, ou encore Burkhardt, Lourdeaux et al., 2006). Ce premier patron concerne les environnements virtuels fondés sur le modèle du tutorat. Il met en scène un apprenant et un (ou deux) formateurs de façon analogue avec les modèles de tutorat en apprentissage (Tableau 11). Les relations observées montrent deux versions, selon que (a) la modalité visuelle est seule impliquée en sortie ou (b) les trois modalités (visuelle, auditive et haptique) sont combinées. Ce patron concerne plutôt des formations visant l'apprentissage du geste, du comportement ou des procédures.

Patron I : EV Tutorat (version a & b)	
DOMAINE FORMATION CIBLE PREFERENTIELLEMENT	Apprentissage geste, comportement, procédure
Paramétrable par l'apprenant	Non
Représentation de l'apprenant	a) Humanoïde b) aucune, partie du corps, outil & partie du corps
Modalités impliquées	a) Vision seule b) Vision, son & haptique
Dispositifs interaction	Capteurs, plate-forme mvt etc. sinon souris 3D, souris PC, joystick etc.
Dispositif visualisation	Casque
Rétroaction	Non, Interaction
Guidage	Non

Tableau 11. Environnement Virtuel de type Tutorat - deux versions a & b

Les deux versions de ce patron exploitent plutôt le visiocasque. Quelle que soit la version, ces environnements virtuels d'apprentissage n'offrent globalement pas de rétroaction d'apprentissage, ce qui pourrait s'expliquer par le fait que, d'une part, le formateur présent en situation prend en charge cette dimension et, d'autre part, la logique de conception est plutôt celle de la simulation et de la recherche de rétroactions « fidèles » à celles existant dans la situation réelle. Enfin, il tend à ne pas y avoir de guidage pour l'utilisateur. Les deux versions du patron diffèrent sur les dimensions sensorielles et motrices impliquées dans l'interaction, sur les dispositifs exploités et au final sur la complexité du système. La première exploite la vision seule ; elle se caractérise par l'usage de dispositifs d'interaction simples allant de la souris PC au joystick à la souris 3D. La représentation de l'utilisateur au sein de l'EV tend à avoir la forme d'un avatar humanoïde. La seconde version, plus complexe, combine la vision, le son et l'haptique. Les

dispositifs d'interaction sont très variés : capteurs, plate-forme de mouvement, dispositifs haptiques originaux ad hoc. Les représentations de l'utilisateur sur le plan de l'interface sont elles aussi fort variées : aucune représentation explicite, une représentation sous la forme d'une partie du corps associée à un outil (par ex. main + clef), ou une représentation de la seule partie du corps (par ex. main). Cette variété est possiblement liée à la variété des utilisateurs, à l'existence de représentations distinctes suivant la phase de l'apprentissage ; notamment lorsque l'interaction repose directement sur l'information délivrée haptiquement par le système, il tend à ne pas y avoir de représentation explicite autre que le retour d'effort.

Les quatre patrons identifiés dans cette étude ne doivent pas être considérés comme des solutions stabilisées et éprouvées. En effet, les systèmes d'aujourd'hui sont jeunes, peu de résultats sont accessibles concernant des évaluations empiriques de l'utilité, de l'utilisabilité et de l'exploitation pédagogique réelles des EV actuels. Néanmoins, il faut souligner deux aspects importants de nos résultats : d'une part, les patrons identifiés à travers l'analyse statistique des liens entre variables s'avèrent avoir une pertinence du point de vue du modèle pédagogique sous-jacent à la conception, dans la mesure où une typologie assez classique des situations pédagogiques se retrouve avec une forme de transcription spécifique. Ainsi, on retrouve bien les situations de tutorat, les situations d'exposé, l'équivalent de la situation de travaux dirigés en groupe ainsi que la situation d'apprentissage autonome en autoformation. D'autre part, les liens soulignés, ici et là, entre telle propriété et telle contrainte sur l'usage (par exemple le lien entre le type d'écran et la situation pédagogique, ou encore le lien entre la configuration de modalités sensorielles et motrices et l'usage pédagogique dans la situation ciblée) militent pour l'idée d'une cohérence entre les choix opérés, les contraintes de la situation et les objectifs d'apprentissage. Il est probable que le manque d'expérience et de recul affecte dans une certaine mesure les configurations observées, sans que l'on puisse aujourd'hui clairement pointer du doigt sur quels aspects.

5.5.3 Faciliter le passage de l'analyse terrain vers la conception de l'environnement virtuel pour l'apprentissage : un langage exploitable pour décrire les actions possibles au cours de la tâche

Plusieurs enjeux pour la conception d'environnements virtuels mieux adaptés sont liés à la capacité offerte, par la démarche ergonomique, d'analyser puis de décrire l'activité des utilisateurs de ces environnements virtuels (Burkhardt, 2003b). Certains enjeux ne sont pas spécifiques aux applications de ces technologies à la formation et à l'apprentissage. Par exemple, la contribution de l'analyse ergonomique renvoie d'une part à l'analyse des besoins préalable à la conception et, d'autre part, à l'analyse de l'activité déployée dans le cadre des études avec les utilisateurs. Deux autres enjeux plus spécifiques au domaine de la réalité virtuelle sont développés à la suite. Le premier consiste en l'exploitation de modèles de l'activité pour interpréter et suivre les actions d'un utilisateur interagissant avec les objets et les autres agents virtuels à l'intérieur du monde mis en scène dans l'environnement virtuel. Le second consiste en la génération de comportements crédibles d'acteurs virtuels anthropomorphes susceptibles d'évoluer et de réagir en temps réel à l'intérieur du même monde virtuel.

5.5.3.1 Suivi de l'apprenant

J'avais proposé initialement d'utiliser des modèles de tâches comme un moyen d'inscrire formellement, au sein de l'environnement, une description de haut niveau des intentions de l'utilisateur apprenant (Burkhardt, 2003b ; Burkhardt, Lourdeaux et al., 1999). En effet, dans la grande majorité des environnements virtuels, le comportement des utilisateurs est encore aujourd'hui représenté - lorsqu'il l'est - de façon frustre. Cette représentation consiste ainsi souvent en la combinaison d'entrées issues des différents capteurs et autres dispositifs d'interface, selon des transformations plus ou moins explicites, de façon à calculer une position ou un vecteur de déplacement dans la scène virtuelle (Burkhardt, 2003b ; Burkhardt, Lourdeaux et al., 1999). Ce type de « représentation » de l'utilisateur réduit de fait les exploitations possibles des actions et des mouvements de l'utilisateur au seul enregistrement d'une trajectoire et à la détection de position. Or pour beaucoup de raisons, il est intéressant de combiner les informations sur le comportement de l'utilisateur en fonction du contexte, et ce à un niveau plus abstrait que celui d'une position instantanée dans un espace tridimensionnel. Je note au passage que d'autres technologies avancées d'interaction ont au moins partiellement recours à une approche analogue, bien que moins riche et non systématiquement associée à une analyse de l'activité réelle des (futurs) utilisateurs. Par exemple, une forme de représentation de la tâche est exploitée afin de guider le traitement des entrées vocales d'un utilisateur en réduisant le champ des possibles et en fournissant une structure pour organiser dans une requête cohérente l'ensemble des commandes/entrées fournies en langage naturel par l'utilisateur au système. Il en est de même dans le contexte de la commande multimodale, dans la mesure où une représentation commune et cohérente des commandes est requise pour calculer la commande résultant de plusieurs entrées combinées. Toutefois,

dans ces deux exemples, c'est plutôt une représentation stricte des entrées attendues au cours de l'interaction, et non pas une description flexible des objectifs possibles poursuivis par l'utilisateur.

Cette idée initiale a été prolongée dans le cadre du projet APLG (Atelier Pédagogique Logiciel Générique). Il s'est agi d'exploiter un tel langage afin de représenter les résultats des analyses réalisées sur le terrain lors de la conception de l'environnement virtuel pour l'apprentissage. La proposition consiste à fonder un outil de suivi de la progression de l'apprenant au cours de la réalisation d'une tâche sur un modèle de l'activité - au sens des variations possibles dans les modalités de réalisation de la tâche de l'opérateur. Lorsque nous avons proposé cette approche, l'originalité résidait dans le fait d'opérer une représentation des objectifs hiérarchisée de l'utilisateur exploitable par le système pour interpréter (ou aider) les actions de l'utilisateur apprenant. Très rapidement, l'idée est ensuite venue qu'une représentation de cet ordre, si elle est possible, doit pouvoir s'appliquer aussi à la représentation des actions erronées, voire doit permettre d'enregistrer les « cheminement » non prévus au cours d'un scénario, quitte à laisser ensuite aux formateurs le soin d'interpréter ces alternatives et, le cas échéant, d'enrichir le modèle.

5.5.3.2 Génération du comportement d'acteurs virtuels

Le second point concerne la génération du comportement d'opérateurs virtuels à partir du même modèle de description, ou plus exactement d'un sous-ensemble des informations décrites dans ce modèle. Il a été en particulier développé dans le cadre du projet PERF RV2 où il s'est agit de formaliser et d'outiller une chaîne de simulation de l'activité au travail à partir d'un modèle (Figure 18). Cette chaîne part des analyses de l'activité des opérateurs pour aboutir à la génération de bibliothèques de comportements exploitables dans tout environnement virtuel requérant la mise en scène d'opérateurs virtuels exhibant un comportement réaliste vis-à-vis du terrain et de l'environnement simulé.

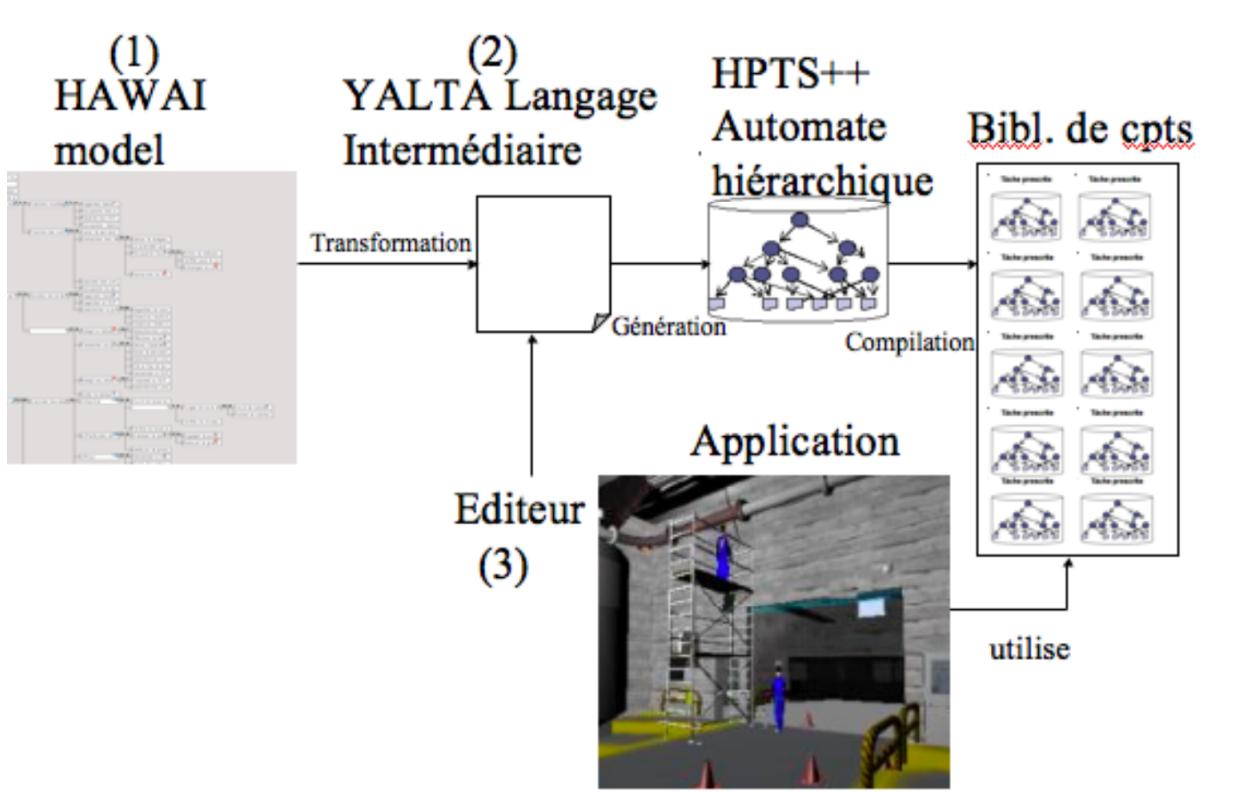


Figure 18. Schéma de principe pour la génération de comportement d'agents autonomes virtuels à partir d'un modèle ergonomique issu d'une analyse de l'activité préalable

5.5.3.3 Vers un langage de description commun

Dans ces deux cas, la modélisation proposée implique à la fois des composants « cognitifs » et les interactions avec le monde ; en ce sens, nous distinguons des purs modèles cognitifs développés pour la simulation (par ex. ACT*, SOAR etc.). Une synthèse des modèles utilisés en ergonomie (Bilavarn, Couix, Rouillé, & Burkhardt, 2008 ; Burkhardt, Lourdeaux et al., 2009 ; Couix, Burkhardt, Donikian, & Rouillé, 2007) nous a amené à proposer un langage hiérarchique s'appuyant pour partie sur MAD* (Scapin & Bastien, 2001) et sur GTA (van Welie & van der Veer, 2003). Ce langage appelé HAWAI (Human Activity and Work

Analysis for Simulation-Description Language) consiste en une description formelle de la tâche accomplie par l'opérateur en situation de travail sous la forme d'une décomposition arborescente de la tâche la plus abstraite (racine) en sous-tâches jusqu'au niveau des actions (feuilles). Il s'agit de rendre compte de la logique de composition des tâches, exploitable ensuite par le moteur de simulation d'agents et, en même temps, de fournir un support facile à la compréhension et à la lisibilité, permettant ainsi à l'ensemble des participants au projet de pouvoir communiquer. Il permet également, à la différence des précédents langages, de rendre compte des difficultés propres à la tâche, des erreurs les plus communes et de l'ensemble des alternatives correctes ou non dont il est souhaitable de rendre compte du point de vue de l'analyste. Par ailleurs, il existe un sous-ensemble de propriétés originales et spécifiques pour la description des éléments liés à la génération ou à l'interprétation des décisions dans un environnement d'activité à risques (spécifiquement développé dans le cadre du projet V3S - Virtual Reality for Safe Seveso Substractors).

Ce travail a été réalisé dans le contexte d'une collaboration suivie avec plusieurs collègues informaticiens au cours de plusieurs projets. En particulier, je souhaite souligner la contribution et les échanges importants avec D. Lourdeaux, et les contributions de nos étudiants respectifs dans différents contextes (S. Couix, D. Gosse pour ce qui est de l'ergonomie, L. Edwards et K. Amokrane pour ce qui est de l'intelligence artificielle). Dans le cadre de projets en particulier, je citerais également les partenaires du LIUM (N. El Keshai, C. Després, P. Tchounikine), de l'IRISA (M. Rouillé, J. Bilavarn, S. Donikian, F. Lamarche), de l'AFPA (D. Mellet D'huart, G. Michel, J.-L. Genest). Le lecteur trouvera une description du langage HAWAI dans Burkhardt, Lourdeaux et al. (2009). Un logiciel de saisie sous java a été développé par les collègues de l'UTC (Figure 19).

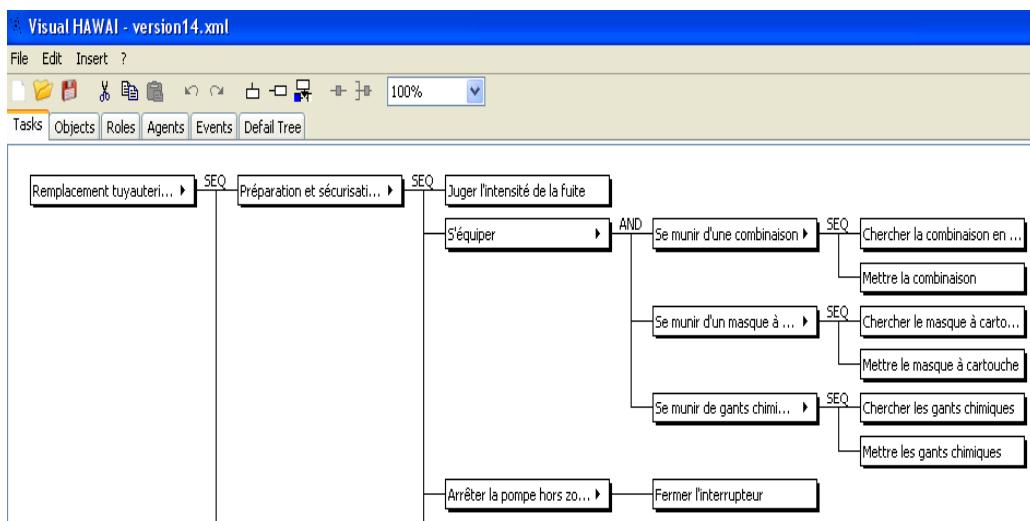


Figure 19. Capture d'écran présentant l'éditeur Visual HAWAI et un extrait de la tâche de remplacement de tuyauterie (scénario développé dans le cadre du projet V3S - Virtual Reality for Safe Seveso Substractors).

5.5.3.4 Représenter le cheminement du travail en intégrant la coordination entre les acteurs, les actions et les évènements

La modélisation de l'activité n'est pas une tâche simple pour l'ergonome. Du reste, j'ai été étonné par l'absence de travaux sur cet aspect du travail de l'ergonome (voir la synthèse dans Couix, 2007). De nombreux aspects de la modélisation du travail restent difficiles à la fois à saisir conceptuellement et à représenter selon les contraintes d'une notation un tant soit peu formelle (je pense en particulier à la flexibilité des situations de travail collectif dès lors qu'une coordination s'y inscrit, comme aux capacités fortes d'adaptation qu'il est possible d'observer dans les situations de travail impliquant un environnement dynamique et ouvert). Or la prise en compte du collectif a été rarement au centre de la modélisation de l'activité, sauf dans la méthode d'analyse GTA (van Welie & van der Veer, 2003) et plus récemment la méthode EORCA (Event Oriented Representation for Collaborative Activities ; cf. Pellegrin, Bonnardel, Antonini, & al., 2007). Intégrer la dimension du collectif dans la représentation des tâches implique de rajouter des moyens variés de les associer aux acteurs et aux rôles, ainsi que d'expliquer les organisations temporelles possibles de leur répartition entre les opérateurs à l'intérieur du collectif. Au côté des notions de rôles et d'agents, la notion de « workflow » sera ainsi une évolution importante des prochaines descriptions des modes opératoires. Un défi pour l'ergonomie réside dans la difficulté à rendre compte de ces différentes propriétés dans un modèle (ou dans plusieurs modèles qu'il convient alors d'articuler) de façon concise,

élégante et simple. Un second défi réside dans le développement d'outils de support à cette activité réellement « ergonomiques », par exemple au travers de logiciels d'aide à la modélisation.

5.5.3.5 Représenter les objets et le domaine du travail

Un dernier aspect concerne la modélisation de l'environnement (et du contexte). En effet, la réalisation d'une tâche implique l'interaction constante avec l'environnement, ce dernier évoluant en parallèle (et parfois à cause) de l'activité développée par les opérateurs. En d'autres termes, la réalisation d'une tâche peut modifier l'état du monde dans lequel l'agent travaille, et à l'inverse, le monde influence la réalisation d'une tâche et est susceptible d'évoluer du fait d'évènements extérieurs aux actions de l'agent. Pour simuler cet environnement de la tâche, il est nécessaire de se doter de la possibilité de décrire formellement les objets qui le composent ainsi que leur comportement et les modifications qu'ils peuvent subir en lien avec la tâche. Des travaux sont en cours sur cet aspect parallèle à la modélisation des tâches, de façon à favoriser la mise en correspondance entre la structure de connaissances décrivant la tâche, d'un côté, et les modèles (probablement simplifiés) du fonctionnement/comportement des objets de l'environnement. Les deux sources de connaissances peuvent être redondantes, complémentaires – voire dans certain cas en désaccord, cela n'est pas problématique, bien au contraire. Cependant, l'une ne peut remplacer l'autre dans la mesure où chacun n'est pas autosuffisant : le modèle de fonctionnement des objets du monde ne permet pas de prédire tous les usages, le modèle de la tâche n'est que le reflet d'objectifs particuliers et n'a pas vocation à décrire tous les états et comportements possibles d'un objet ou d'un système.

5.5.4 Conclusion

Les rapports entre apprentissage, ergonomie et technologies émergentes sont donc multiples, et pas toujours bien connus des différents acteurs du domaine – y compris au sein même de l'ergonomie des technologies émergentes. L'objectif de ce chapitre était de montrer une image de ces différents rapports en soulignant l'ensemble des points sur lesquels des contributions de l'ergonomie sont possibles.

J'ai évoqué plusieurs de mes contributions à la conception et l'évaluation des technologies émergentes exploitées dans le cadre d'une situation de formation. Celles-ci sont de plusieurs types :

- des synthèses et états de l'art dans les domaines de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée pour l'apprentissage réalisés pour la 4ième Ecole thématique CNRS EIAH sur « Simulation, réalité virtuelle et augmentée pour l'apprentissage » (Burkhardt, 2006a ; Joab & Burkhardt, 2006) et mis à jour récemment pour une conférence invitée à la conférence francophone EIAH sur l'ingénierie des environnements interactifs d'apprentissage humain (Burkhardt, 2009) ainsi que plus généralement en ce qui concerne les perspectives et apports de l'ergonomie à la conception et à l'évaluation des technologies émergentes dans un contexte de formation et d'apprentissage. Ces synthèses, élaborées initialement dans le cadre d'un projet de simulateur pour la formation (i.e. projet SOFI, Burkhardt & Wolff, 2002) ont été enrichies régulièrement pour plusieurs contextes d'enseignement : en particulier une école d'été doctorale européenne en Psychologie du Travail (Burkhardt, 2002), une conférence invitée lors de la seconde école d'été du CNRS sur les environnements interactifs d'apprentissage humain (Burkhardt, 2004b), ainsi que lors d'un séminaire ERASMUS (Burkhardt, 2006c) ;
- des études empiriques centrées sur l'activité d'experts de la tâche, d'opérateurs à former ou de formateurs. Le rôle central de l'analyse de l'activité – qu'il s'agisse de l'activité actuelle comme modèle ou comme référence à un futur probable – y est souligné, de même que les modèles et méthodes que cette analyse est susceptible d'offrir à la conception des environnements interactifs pour l'apprentissage humain. Ces études, qu'elles soient réalisées sur le terrain ou en laboratoire, se distinguent - de façon un peu caricaturale certes- des études portant sur des propriétés générales de l'activité humaine, en ce qu'elles visent la compréhension et la connaissance d'une activité finalisée représentative de la situation réelle ciblée. La tâche et la situation d'étude ne sont pas choisies parce qu'elles permettent de soumettre à l'évaluation les prédictions d'une théorie ou d'un modèle général testés, mais parce qu'elles constituent l'objet et l'enjeu même de la situation de formation à (re)concevoir. Le statut de la théorie et du paradigme exploité dans de telles études renvoie d'ailleurs plutôt à celui d'outil et de guide : outil pour construire ou produire des observables, et guide pour sélectionner et interpréter les observables les plus pertinents. En retour, ce type d'étude participe néanmoins du développement des théories et des modèles, d'une part en ce qu'il peut en suggérer certains traits originaux et, d'autre part, en ce qu'il constitue une épreuve de leur capacité à éclairer les situations réelles où se développe l'activité humaine. Un exemple est fourni par l'étude (Burkhardt et al., 2002) sur les représentations mentales de concepteurs experts et novices en conception par objets et sur l'influence de la consigne/tâche sur la compréhension (voir § 4.5.1.).

- des études sur le processus de conception et sur les propriétés des situations et des artefacts technologiques qui y sont mobilisés.

J'ai également évoqué certains des travaux en cours concernant l'assistance à la conception des environnements virtuels pour l'apprentissage.

Trois perspectives prolongent cet exposé du domaine des technologies émergentes pour l'apprentissage.

La première réside dans l'**évaluation de l'apport des propositions méthodologiques évoquées dans ce chapitre pour assister la conception des EIAH, et l'étude empirique de leurs usages, les difficultés et les bénéfices avérés**. L'évaluation concerne notamment l'usage des patrons de conception, l'exploitation des outils d'analyse et de description des configurations sociotechniques et pédagogiques. L'enrichissement des méthodes de la conception centrée-utilisateurs afin de prendre en compte la spécificité de la formation constitue aussi de ce point de vue un enjeu important.

La seconde perspective réside dans la poursuite du **développement d'outils d'accompagnement à la conception et à la modélisation pour les environnements virtuels/augmentés pour la formation et l'apprentissage**. Le langage HAWAI décrit dans la partie précédente nécessite en particulier de nouveaux développements pour être pleinement utilisable dans le contexte de la description de tâches collectives, sur le plan des flux et des dépendances entre rôles, objets et évolutions de l'état de l'environnement virtuel.

Enfin, une troisième perspective concerne **l'amélioration de l'interaction des utilisateurs au sein des environnements de réalité virtuelle et de réalité augmentée**. Une première question tant théorique que pratique réside dans la question du **rapport entre utilisabilité et apprentissage dans ces nouveaux types d'environnements interactifs pour l'apprentissage humain**. En parallèle de cet aspect spécifique de la question du rapport avec l'apprentissage, les propriétés actuelles des environnements virtuels et de réalité augmentée, en termes de facilité d'utilisation et d'intelligibilité des règles de fonctionnements, requièrent un travail important sur le plan de la compréhension des facteurs impliqués dans les difficultés d'utilisation et sur les techniques d'interaction les plus efficaces.

Conclusion et perspectives de recherche

6 Conclusion et perspectives de recherche

6.1 Bilan des contributions

Les travaux exposés dans ce mémoire ont été menés dans le contexte de technologies en cours d'émergence. Cela m'a conduit à caractériser ce contexte et à montrer l'intérêt et les questions spécifiques qu'il pose à la recherche en ergonomie comme à la pratique.

Cela m'a conduit aussi à vouloir observer comment l'apprentissage et le développement humain est abordé par l'ergonomie informatique dans ce contexte. Diverses dimensions de l'apprentissage et du développement des individus et des organisations ont pu ainsi être examinées, certaines de ces dimensions étant peu considérées à mon sens dans les approches de l'ergonomie informatique et des technologies émergentes aujourd'hui. Cela m'a permis d'esquisser une cartographie du thème de l'apprentissage et du développement dans ce champ. Il s'agit bien d'une esquisse dans la mesure où je ne prétends pas être exhaustif ici.

Pour assurer cette réflexion, j'ai distingué trois catégories d'activités auxquelles les études ergonomiques s'intéressent en relation avec des artefacts issus des technologies émergentes : la **conception**, l'**utilisation** et la **formation**. Cette distinction fournit l'opportunité de mettre en perspective différents niveaux d'analyse et de processus d'apprentissage auxquels il est fait référence en ergonomie informatique, en articulation avec différents niveaux d'échelle (le groupe, le collectif, l'individu) :

- **rechercher, élaborer, voire mémoriser une « nouvelle » information requise pour l'atteinte d'un objectif.** Plutôt adoptée dans les études sur les activités de **conception** considérées à l'échelle du groupe voire d'un collectif plus large, cette posture renvoie notamment au cadre des apprentissages croisés, à celui des communautés épistémiques et à celui de la conception dans l'innovation intensive.
- **mémoriser ou comprendre une information spécifiée.** A l'échelle d'un collectif, cette posture est plutôt mobilisée dans les approches centrées sur la **capitalisation** des connaissances pour traiter de l'apprentissage organisationnel. Le sujet individuel pris comme unité d'analyse, cette posture renvoie d'une part à la notion « d'apprenabilité » dans l'**utilisation** des artefacts technologiques (l'information à acquérir concerne alors la procédure d'utilisation ou les règles de fonctionnement du dispositif). Elle renvoie d'autre part à la **formation** au moyen des technologies d'apprentissage (l'information à acquérir est définie cette fois en regard d'objectifs et de contenu d'apprentissage définis au préalable).
- **développer des compétences, construire des connaissances par la prise de conscience et la réflexion sur l'expérience.** Cette dernière posture renvoie, dans les groupes et les collectifs, à certains des processus mis en valeur par le cadre des communautés épistémiques, ainsi que par le cadre des processus d'échanges croisés mutuels dans la **conception**. Cette posture se retrouve aussi à l'échelle individuelle, dans les approches de l'activité de conception mettant l'accent sur le dialogue réflexif avec les objets et la situation, ainsi que dans les approches de l'**utilisation** fondées sur l'idée de genèse instrumentale.

Ce découpage en trois catégories d'activités met en évidence l'association privilégiée de chacune avec certains processus ou certains cadres théoriques. Cependant, une telle association ne doit pas masquer le fait que les différents processus s'expriment potentiellement dans toute activité finalisée. Au-delà des modèles, des connaissances et des approches usitées traditionnellement en ergonomie informatique, il me semble y avoir là une invitation à considérer comment ces différents cadres peuvent être – ou non – articulés pour rendre compte de la richesse des processus mis en œuvre dans les situations variées d'utilisation des technologies émergentes, l'utilisation pouvant prendre place dans une activité de conception, comme dans une activité de formation. Je propose quelques pistes dans les parties conclusives des trois chapitres évoquant successivement la conception, l'utilisation et formation.

6.2 Deux perspectives de recherches

6.2.1 Vers une approche multidimensionnelle et développementale de l'activité dans les nouveaux espaces mixtes à l'interface du « réel » et du « virtuel »

Cette perspective se situe dans la suite logique des travaux engagés sur l'ergonomie des environnements virtuels et augmentés. La recherche sur ces technologies fait s'entremêler de plus en plus des éléments concrets issus du monde réel et des créations synthétiques contrôlées par ordinateur, dans le contexte d'activités qui impliquent des collectifs variés sur le plan de la forme comme du nombre et de l'engagement des participants, dans des contextes également eux-mêmes potentiellement changeant.

Cette évolution influence en retour les questions, les connaissances impliquées et les demandes d'intervention de l'ergonomie. Ainsi, les connaissances et les méthodes en ergonomie des logiciels sont traditionnellement centrées sur l'assistance à l'activité de l'expert réalisant une tâche qu'il connaît bien. Or, de plus en plus d'applications de l'informatique impliquent un apprentissage, qu'il s'agisse d'apprendre à utiliser, d'apprendre une tâche ou un contenu, avec peu de littérature ergonomique sur le sujet. De même, la prise en compte des dimensions collectives et sociales des activités se limite à quelques outils orientés vers la description des tâches incluant la notion de rôle (par exemple, GTA [GroupwareTask Analysis], van der Veer, 2002), sans réelle capacité à prédire l'interaction entre la technique, les facteurs individuels et le niveau organisationnel. Des questions sur l'interaction entre la perception et la cognition, voire l'émotion, se posent à nouveau avec acuité dans ces nouveaux domaines de la recherche technologique comme la réalité virtuelle (Burkhardt, 2003b).

Je fais référence à trois dimensions d'extension en particulier : la prise en compte de la dimension collective et sociale, la nature incorporée et hybride de l'interaction, et la modélisation.

6.2.1.1 Appréhender la dimension sociale, collective de l'activité dans ces nouveaux espaces

Concernant la dimension sociale et collective de l'activité, j'envisage de poursuivre les travaux sur l'évaluation de la qualité de la collaboration dans les situations assistées par des environnements informatiques de type réalité virtuelle ou augmentée. Par exemple, des travaux pour poursuivre la mise au point de la méthode d'évaluation de la qualité de collaboration (Burkhardt, Détienne, Hebert & al. 2009) et son possible outillage sont en cours sur l'usage du bureau virtuel développé par des collègues de l'Université de Liège dans le contexte de la conception architecturale dans la phase d'esquisse. Une autre piste concerne la mobilisation de cadres et de concepts mieux adaptés à la réalité sociale et collective des activités de conception (par ex. notion de point de vue ; cf. Wolff, Burkhardt & de la Garza, 2005), de façon à rendre compte des différents phénomènes qui permettent d'appréhender l'activité au-delà du raisonnement et des représentations mentales individuelles. Une dernière piste porte sur le développement des environnements en ligne et sur la façon dont les fonctionnalités qu'ils offrent aux utilisateurs facilitent ou non une forme d'identité sociale et de développement des participants dans ces communautés (voir par ex. Burkhardt, 2007).

6.2.1.2 Le caractère incarné et hybride des interactions implique une évolution des cadres théoriques et des méthodes

Dans le contexte des environnements virtuels, la cognition n'est généralement pas « purement » symbolique ni « désincarnée », du fait de l'implication croissante du corps et de la gestion du geste et du mouvement dans l'interaction. Les actions de l'utilisateur sont généralement instrumentées par des dispositifs ayant plusieurs degrés de liberté dans un espace physique variable (pouvant aller jusqu'à l'échelle d'une pièce complète), éventuellement en association avec des dispositifs de commande plus traditionnels (souris, joystick,...) et la voix. Les modalités visuelle mais également tactile, kinesthésique et sonore prennent ainsi place dans la boucle perception-cognition-action. Dans Burkhardt (2007), j'ai présenté et discuté des perspectives concernant trois thématiques où l'ergonomie devrait contribuer empiriquement à l'amélioration de l'utilité et de l'utilisabilité des Environnements Virtuels : l'immersion, les représentations des utilisateurs et des agents anthropomorphes et, enfin, les activités coopératives au sein des environnements virtuels. Je souligne aujourd'hui la nécessité d'un élargissement des approches actuelles selon au moins deux directions complémentaires.

Il s'agit d'abord d'élargir les sphères de l'activité humaine soumises à l'analyse. Les seules dimensions perceptives et motrices, très représentées au demeurant, ne suffisent pas. Par exemple, le raisonnement, la communication, l'action collective, les processus sociaux sont autant de dimensions qui méritent d'être

étudiées pour mieux cerner les besoins et les difficultés des utilisateurs dans ces mondes numériques- dans l'objectif de concevoir des environnements offrant une meilleure assistance. Au-delà des critères habituels de l'ergonomie des systèmes interactifs tels l'utilité, l'utilisabilité, l'accessibilité ou encore la satisfaction et l'acceptabilité, des questions liées à l'éthique et à certains dangers de ces technologies font également suggérer d'ajouter les critères d'utilité sociale et de dangerosité sociale à la réflexion des chercheurs et des concepteurs dans le champ des environnements virtuels.

Ensuite, sur le plan paradigmatic, la seule mesure de performance est apparue clairement insuffisante pour comprendre les mécanismes cognitifs et sociaux mis en œuvre dans ces nouveaux espaces numériques pour lesquels la « réalité » est à la fois matérielle et virtuelle. Face aux évolutions de ces environnements, les concepts et les méthodes doivent être développés pour aider l'analyse fine de l'activité, des stratégies et des comportements, afin d'éclairer les résultats empiriques des études. Cela passe par le recours à plusieurs méthodes de recueil et d'analyse permettant de croiser et de combiner à la fois des sources subjectives et des sources objectives sur l'activité, voire d'utiliser des techniques permettant un certain retour sur les étapes de l'activité (par ex. auto-confrontations, entretien d'explicitation). Dans la même veine, il semble important de développer des études longitudinales et sur les usages. La tendance est en effet forte à vouloir dégager des indicateurs simples et « objectifs » pour évaluer ces nouveaux espaces virtuels. Ce faisant, si l'on s'y restreint, il est fort probable que l'on ait plus de difficultés à accéder aux déterminants réels de l'activité dans ces nouveaux environnements, ce qui est problématique dans une logique d'innovation et de préparation d'interfaces et de systèmes du futur réellement adaptés aux besoins (et aux caractéristiques) des utilisateurs.

Cette direction est actuellement poursuivie dans le cadre de la thèse de S. Abbasi, dans le cadre d'une codirection avec M. Denis du LIMSI-CNRS. Nous y étudions en effet l'activité liée à des tâches de montages nécessitant à la fois la manipulation de pièce et la résolution de problème (Abbasi, Burkhardt & Denis 2009a ; Abbasi, Burkhardt & Denis 2009b).

6.2.1.3 Le rôle central de la modélisation : modélisation du réel dans le virtuel, modèles virtuels pour agir sur le réel

L'approche ergonomique investit essentiellement la question de la modélisation du côté de l'activité, une compréhension globale du système de travail étant vue comme suffisante pour appréhender l'activité. Modéliser l'action, la tâche ou l'activité fait en effet partie des contributions de longue date de l'ergonomie à la conception des outils et technologies informatiques.

Dans les environnements qui mêlent mondes virtuels et monde réel, il est un besoin croissant de modéliser au-delà de l'action, les objets et le contexte sur lequel porte cette action. Dans le domaine de la formation notamment, il est impératif d'avoir également une représentation cohérente du domaine. Or actuellement, cette représentation est souvent partielle et intégrée aux prescriptions de formation, i.e. est implicitement contenue dans les objectifs (ou les arguments) associés à la conception d'un dispositif de formation. En outre, ces deux facettes du modèle « complet », i.e. les actions et le modèle de comportement des objets dans l'environnement suite à ces actions, doivent être articulées, dans le déroulement de la simulation certes, mais aussi et avant tout au moment de la conception. Mes travaux vont donc se poursuivre sur cet axe de la modélisation, tant du point de vue de l'outillage (outil et méthodes) pour développer de tels modèles (notamment dans la suite d'HAWAI), que du point de vue de la compréhension de l'activité de modélisation elle-même par ceux qui la réalisent. Ce dernier point est d'autant plus important que de nombreuses difficultés des utilisateurs de ces outils de modélisation ont pu être mises en évidence à la fois quant à la représentation de certains cheminements possibles de l'action, et à la fois quant à la capacité des langages ergonomiques de formalisation de l'activité à exprimer la variabilité de actions et des comportements observables sur le terrain (Burkhardt, Girard et al., 2009).

J'ajouterais en retour un aspect développé dans Burkhardt (2003) sur l'usage de la réalité virtuelle en ergonomie. Dans cet article, je montrais que les capacités de modélisation, de représentation et de génération de scénarios de la réalité virtuelle offrent potentiellement un usage à développer dans quatre des champs d'intervention traditionnels de l'ergonomie que sont l'assistance à l'activité, la formation, l'analyse du travail, la conception d'outils et de nouvelles situations de travail. Dans ce contexte, la précision et la capacité des modèles à représenter la réalité du terrain constituent des enjeux importants pour l'acceptabilité de ces nouveaux outils.

6.2.2 Vers une ergonomie des technologies émergentes et de l'innovation

Cette seconde perspective prolonge mes études sur les activités de conception. Il s'agit de capitaliser et d'étendre notre compréhension de l'activité de conception dans le contexte des technologies émergentes. Il

s'agit en parallèle de développer des méthodes dont la contribution à la conception et à l'innovation technologique devra être évaluée in fine.

Dans le domaine du développement technologique, la logique qui a prévalu et prévaut souvent encore (y compris en ergonomie) consiste à estimer que la technologie « émerge », et le reste suit, s'adapte²². Par « reste », il faut entendre ici les usages et les adaptations tant sociales qu'individuelles qui s'y réfèrent. C'est une vision qui tend à repousser l'émergence technologique en dehors de la sphère d'action des autres acteurs (notamment les utilisateurs, l'ergonome). Dans ce contexte, l'ergonomie viserait au mieux à tenter d'améliorer telle ou telle technologie, à en minorer les risques ou les problèmes initiés par son introduction. Des brèches à cette vision ont été théorisées en ergonomie. Les approches participatives de la conception ont initialement mis en avant un certain idéal démocratique de la participation des opérateurs/utilisateurs aux décisions de conception, pour ensuite insister sur un éventail plus large des rôles et des contributions qu'ils peuvent avoir dans la conception (voir par ex. Kensing & Blomberg, 1998 ; Wilson, 1991). Les travaux sur la notion d'instrument ont souligné que la conception se continue à travers l'usage et que les utilisateurs sont aussi capables de faire preuve d'inventivité (Rabardel & Beguin, 2005).

Il en découle plusieurs pistes évoquées à la suite en ce qui concerne mes travaux futurs.

6.2.2.1 Développer une approche intégrant les utilisateurs (probables, futurs, potentiels) dès l'étape de recherche dans les technologies émergentes

Un levier complémentaire pourrait en effet résider dans l'organisation et l'outillage de la réelle participation des utilisateurs et des opérateurs dès les activités de la recherche technologique. Permettre cette intégration très en amont du développement des technologies émergentes, lorsque celles-ci ne sont pas matures, permet d'imaginer une recherche technologique qui se co-développe de façon plus harmonieuse avec les besoins humains. Il y a évidemment plusieurs risques et difficultés dans cette approche, sur lesquels la littérature en ergonomie informatique reste peu diserte. Il y a également plusieurs défis pour permettre d'agir, in fine, sur le développement des systèmes sociotechniques. Cette direction est actuellement suivie dans le cadre du travail de thèse de Emilie Loup-Escande (Loup-Escande, Burkhardt, Christofol & Richir 2010) co-encadré avec S. Richir et H. Christofol de l'Ensam d'Anger. Nous y comparons notamment la contribution de différentes méthodes et des acteurs tout au long d'un processus de conception innovante, en s'intéressant en particulier aux processus d'élicitation et d'élaboration des besoins ainsi qu'aux processus qui conduisent à leur intégration ou non dans le produit final.

6.2.2.2 Etudier et mieux comprendre les mécanismes liés à l'appropriation et au développement des compétences à travers l'utilisation et les usages de ces « nouveaux » espaces d'interaction

Deux approches complémentaires m'intéressent en particulier concernant cette question de « l'étude et la compréhension des mécanismes liés à l'appropriation et au développement des compétences à travers l'usage ».

La première porte sur l'étude, peu investie dans les approches de l'ergonomie informatique les plus centrées sur l'interaction, des phases préliminaires d'utilisation, voire avant même l'utilisation, pour comprendre selon une approche longitudinale la façon dont se construisent les connaissances et les compétences liées à l'usage. Il s'agit en d'autres termes d'observer pendant un laps de temps plus long, et en tenant compte de facteurs comme la présentation, l'opinion initiales, etc. la façon dont se construit le lien entre utilisation et apprentissage, ainsi que les facteurs qui influencent cette étape de l'appropriation.

La seconde concerne l'étude des mécanismes à l'œuvre dans l'utilisation et leur lien avec l'apprentissage et la construction d'une meilleure compréhension de la situation du point de vue des utilisateurs. Sur le plan pratique, il est nécessaire d'entamer des évaluations des approches telles que celle prônée par la conception d'interface écologique de Vicente (2002), sur des terrains variés, en ce qui concerne la capacité

²² On trouve une illustration partielle de cette thèse dans l'exposé de Bartlett (1962) qui relève que l'ergonomie a su essentiellement suivre l'évolution de la technique, plutôt que l'inverse : « As I understand it the basic aims of the science of ergonomics are: 1. to keep in close touch with the advance of invention in whatever fields constitute the special range of interest of the investigator; 2. to get in at as early a stage as possible, so as to ensure that the worth-while invention takes a form most consistent with human efficiency and health; 3. to study how to reduce the time gap between potential and actual technological advance. Up to now it seems to me that the first and second of these requirements have been pretty well met. The third we have done little to develop (...). Dans un article récent, Hoc (2008) renouvelle le constat : « Over the past 40 years, rapid technological advances have driven cognitive ergonomics development more and more. (...) Still nowadays, for its major part, the progress is technical and triggers ergonomics research rather than following its recommendations. »

des outils et nouvelles interfaces à effectivement faciliter le maintien voire le développement des compétences. De même, il s'agit d'évaluer la capacité de ces outils et nouvelles interfaces à faciliter une compréhension profonde du domaine de travail avec lequel les utilisateurs interagissent par l'intermédiaire de l'interface et du système technologique considéré.

6.2.2.3 Vers une ergonomie de la conception des situations et des technologies d'apprentissage

Enfin, les méthodes et les outils proposés pour la conception des environnements virtuels pour la formation en particulier, et pour la conception et l'évaluation des environnements interactifs pour l'apprentissage humain, demandent à être mis à l'épreuve et à être améliorés au fur et à mesure de l'expérience des projets. Il s'agit là d'une perspective sur un plus long terme.

6.3 Conclusion

La recherche dans le domaine des technologies émergentes invite aux échanges avec les autres disciplines et les autres épistémologies qui s'intéressent à l'homme afin de mieux comprendre et caractériser les propriétés de l'interaction dans les nouveaux espaces virtuels ou augmentés. L'ergonomie y a toute sa place dans l'intervention comme dans la recherche concernant de nombreuses dimensions des activités et du développement humains. Un certain nombre de pistes sont évoquées dans ce mémoire. D'autres restent assurément à découvrir.

7 Références

- Abbasi, S., & Burkhardt, J.-M. & Denis, M (2009). Spatial problem solving: assembling three-dimensional puzzles in real and virtual environments. *Cognitive Processing - International Quarterly of Cognitive Science*, 10, 179-181.
- Abbasi, S., Burkhardt, J.-M., & Denis, M. (2009). Assister le montage d'objets en réalité virtuelle : étude préliminaire de la résolution de problèmes tri-dimensionnels en environnement réel. In actes du 5eme Colloque de psychologie ergonomique EPIQUE, Nice, France 28-30 septembre 2009.
- Ahmed, S. M. Z., McKnight, C., & Oppenheim, C. (2005). A study of learning and retention with a Web-based IR interface *Journal of Librarianship and Information Science* 37, 7-16.
- Ainsworth, S. E. (1999). Designing Effective Multi-representational Learning Environments (technical report No. 58). Nottingham: ESRC Centre for Research in Development, Instruction and Training - University of Nottingham.
- Akrich, M., Callon, M., & Latour, B. (1988). A quoi tient le succès des innovations? 1 : L'art de l'intéressement, Gérer et comprendre. *Annales des Mines*, 11, 4-17.
- Aliakseyeu, D., Martens, J.-B., & Rauterberg, M. (2006). A computer support tool for the early stages of architectural design. *Interacting with Computers*, 18, 528–555
- Altmann, E., Larkin, J. H., & John, B. E. (1995). Display Navigation by an Expert Programmer : a preliminary Model of Memory. In proceedings of ACM CHI'95, May 7-11 1995 Denver Colorado.
- Anastassova, M. (2003). L'activité des mécaniciens et les évolutions de la conception de véhicules : une étude ergonomique exploratoire d'une assistance par la réalité augmentée. Master thesis, University Paris Descartes, Paris.
- Anastassova, M. (2006). L'analyse ergonomique des besoins en amont de la conception de technologies émergentes. Le cas de la réalité augmentée pour la formation à la maintenance automobile. Thèse de doctorat en Ergonomie de l'Université Paris 5, 13 décembre 2006, Université Paris 5, Paris.
- Anastassova, M., & Burkhardt, J.-M. (2007). User-Needs Analysis for Home Applications and Emerging Technologies: Some Methodological Aspects. Proceedings of Workshop 'Are New Methods Needed in User-Centered System Design?', INTERACT'07, september 10-14, Rio de Janeiro.
- Anastassova, M., & Burkhardt, J.-M. (2009). Automotive technicians' training as a community-of-practice: implications for the design of an augmented reality teaching aid. *Applied Ergonomics*, 40, 713-721.
- Anastassova, M., Burkhardt, J.-M., & Mégard, C. (2007). User-Centred Design and Evaluation of Augmented Reality Systems for Industrial Applications: Some Deadlocks and Breakthroughs. Proceedings of the Virtual Reality International Conference VRIC, 18-20 April Laval, France.
- Anastassova, M., Burkhardt, J.-M., Mégard, C., & Breda, J. (2006). Evaluation ergonomique d'un prototype de réalité augmentée par des tests utilisateurs : apports et difficultés. Actes de ERGOIA 2006 France : Biarritz, November.
- Anastassova, M., Burkhardt, J.-M., Mégard, C., & Ehanno, P. (2005). Results from a user-centred critical incidents study for guiding future implementation of augmented reality in automotive maintenance. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35, 81-91.
- Anastassova, M., Burkhardt, J.-M., Mégard, C., & Ehanno, P. (2007). L'ergonomie de la réalité augmentée pour l'apprentissage : une revue. *Le Travail Humain*, 70, 97-126.
- Anastassova, M., Burkhardt, J.-M., Mégard, C., & Leservot, A. (2005). User-centred design of Mixed Reality for vehicle maintenance training: an empirical comparison of two techniques for user needs analysis. Proceedings of the Conference HCI international (CDROM), Las Vegas, USA.
- Anastassova, M., Mégard, C., & Burkhardt, J.-M. (2007). Prototype Evaluation and User-Needs Analysis in the Early Design of Emerging Technologies. Proceedings of the Conference HCI-International, Pekin, China.
- Anderson, J. R., Conrad, F. G., & Corbett, A. T. (1989). Skill Acquisition and the LISP Tutor. *Cognitive Science*, 13, 467-505.

- Annett, J. (2004). Hierarchical Task Analysis. In D. Diaper & N. Stanton (Eds.), *Handbook of Task Analysis for Human Computer Interaction* (pp. 67-83). Mahwah, New Jersey: Laurence Erlbaum Associates.
- Annett, J., Cunningham, D., & Mathias-jones, P. (2000). A method for measuring team skills. *Ergonomics*, 43, 1076-1094.
- Annett, J., & Duncan, K. D. (1967). Task analysis and training design. *Journal of Occupational Psychology*, 41, 211-221.
- Annett, J., Duncan, K. D., Stammers, R. B., & Gray, M. J. (1971). Task analysis. London: Her majesty's stationery office.
- Anson, T., Draper, S., & Carrol, J. M. (Eds.). (1998). *Minimalism beyond the Nurnberg Funnel*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Arab, F. (2004). Vers une modélisation de l'activité de supervision d'exercices de combat en simulation. - Master's thesis (DEA), Université Paris Descartes, Paris.
- Aubert, S. (1999). Présentation de l'histoire de la formation des peintres. Actes des journées de Bordeaux sur la pratique de l'ergonomie, Bordeaux.
- Aubert, S. (2000). Transformer la formation par l'analyse du travail : Le cas des peintres aéronautiques. *Education Permanente*, 143, 51-63.
- Bach, C. (2004). Elaboration et validation de critères ergonomiques pour les interactions Homme-Environnements virtuels. Thèse de doctorat de 3 eme cycle en Psychologie, Université de Metz, Metz.
- Bach, C., Anastassova, M., & Burkhardt, J.-M. (2008). Réflexions sur les complexités technologique, organisationnelle et humaine de la conception des technologies émergentes : l'exemple de la réalité virtuelle, mixte et augmentée. Paper presented at the Société d'Ergonomie de Langue Française - 43ème congrès, .
- Bainbridge, L. (1987). Ironies of automation. In J. Rasmussen, K. D. Duncan & J. Leplat (Eds.), *New technology and human error* (pp. 271-284). Chichester, UK: Wiley.
- Bainbridge, L. (1993). Planning the training of a complex skill. *Le Travail Humain*, 56, 211-232.
- Baker, M., Détienne, F., Lund, K., & Séjourné, A. (2003). Articulation entre élaboration de solutions et argumentation polyphonique. Proceedings of Deuxièmes Journées d'Etude en Psychologie ergonomique – EPIQUE, Boulogne-Billancourt, France, 2-3 october, 2003.
- Bannon, L. J. (1992). From Human Factors to Human Actors : The Role of Psychology and Human-Computer Interaction Studies in Systems Design. In J. Greenbaum & M. Kyng (Eds.), *Design at work : Cooperative Design of Computer Systems* (pp. 25 - 44). Mahwah, NJ, USA: Lawrence Erlbaum Associates.
- 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, 47-94.
- Barcellini, F. (2008). Conception de l'artefact, conception du collectif : dynamique d'un processus de conception ouvert et continu dans une communauté de développement de logiciels libres. Thèse de doctorat en Ergonomie, CNAM, Paris.
- Barcellini, F., Détienne, F., & Burkhardt, J.-M. (2005). Activité de conception de logiciels libres : dynamique et temporalité dans les discussions en ligne. In actes des 3èmes journées d'études en psychologie ergonomique - Epique'05, 26-28 september, 2005, Toulouse, France.
- Barcellini, F., Détienne, F., & Burkhardt, J.-M. (2006a). User's participation in the design process of Open source Software Communities: the case of Python. Europython 2006 conference, CERN, Geneva 3-5 july 2006.
- Barcellini, F., Détienne, F., & Burkhardt, J.-M. (2006b). Users' participation to the design process in a Free Open Source Software online community. Proceedings of the 18th annual PPIG conference, Brighton, UK september 7-8th.
- Barcellini, F., Détienne, F., & Burkhardt, J.-M. (2007a). Conception de logiciels libres : enjeux pour l'ergonomie et rôle des utilisateurs dans le processus de conception. Conference de la Société d'Ergonomie de Langue Française, Saint-Malo.

Barcellini, F., Détienne, F., & Burkhardt, J.-M. (2007b). Cross-Participation to foster design-use mediation in Open Source Sofware design process. Proceedings of the ECCE2007 European Conference on Cognitive Ergonomics, London.

Barcellini, F., Détienne, F., & Burkhardt, J.-M. (2007c). OSS design communities: an emergent form of distributed participatory design. Workshop on Converging on a "Science of Design" through the Synthesis of Design Methodologies, ACM CHI 2007, April 29, 2007, San Jose, California, USA.

Barcellini, F., Détienne, F., & Burkhardt, J.-M. (2008). Requirements for design participation in open source software communities. Paper presented at the Workshop on Distributed Participatory Design associated to the ACM international conference on human computer interaction CHI 2008 5-10 april Florence, It

Barcellini, F., Détienne, F., & Burkhardt, J.-M. (2009a). Measuring participation in online interaction spaces: boundary spanning in an Open Source Software community. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39, 533–540.

Barcellini, F., Détienne, F., & Burkhardt, J.-M. (2009b). Participation in an Open Source Software Community. Proceedings of the 17th World Congress on Ergonomics IEA 09, Pekin, august 2009.

Barcellini, F., Détienne, F., & Burkhardt, J.-M. (2009c). Participation, conscience sociale et conscience du projet dans une communauté de conception et d'usage de logiciels libres. Actes du 44 eme congrès de la SELF, Toulouse.

Barcellini, F., Détienne, F., Burkhardt, J.-M., & Sack, W. (2005a). A study of on-line discussions in Open-Source Software Community: Reconstructing thematic coherence from citation practices. Workshop « Free/open-source », Conference « Communities and Technologies'05 », Milano, It, 13-16 June.

Barcellini, F., Détienne, F., Burkhardt, J.-M., & Sack, W. (2005b). Thematic coherence and quotation practices in OSS design-oriented online discussions. ACM Group 2005 Conference (GROUP'05), Sanibel Island, Florida, USA, November 6-9.

Barcellini, F., Détienne, F., Burkhardt, J.-M., & Sack, W. (2006). Visualizing Roles and Design Interactions in an Open Source Software Community. In proceedings of the Workshop on "Supporting the Social Side of Large-Scale Software Development", CSCW'06 conference, November 4-8, Banff, Alberta, Canada.

Barcellini, F., Détienne, F., Burkhardt, J.-M., & Sack, W. (2008). A socio-cognitive analysis of online design discussions in an Open Source Software community. *Interacting With Computers*, 20(141-165).

Barcellini, F., Détienne, F., & Burkhardt, J.-M. (2008). Users and developers mediation in an Open Source Software Community: boundary spanning through cross participation in online discussions. *International Journal of Human-Computer studies*, 66, 558-570.

Barki, H., & Hartwick, J. (1991). User participation and user involvement in information system development. Proceedings of the 24th Annual Hawaii International Conference on System Sciences.

Bartlett, F. (1962). The future of ergonomics. *Ergonomics*, 5, 505-511.

Bastien, J.-M. C., & Scapin, D. L. (1993). Ergonomic criteria for the evaluation of Human-Computer Interfaces (Technical Report No. 156). Rocquencourt, France: Institut National de Recherche en Informatique et Informatique.

Bastien, J. M. C., Scapin, D., & Leulier, C. (1998). Une comparaison des Critères Ergonomiques et des Principes de dialogue ISO 9241-10 dans une tâche d'évaluation d'interface. *Revue d'Interaction Homme-Machine*, 1, 33-63.

Bazile, J., & Mayen, P. (2002). Le développement des concepts scientifiques à partir des conceptualisations dans l'action. Proposition de didactique professionnelle. *ASTER*, 34, 75-96.

Beckwith, L., Kissinger, C., Burnett, M., Wiedenbeck, S., Lawrence, J., Blackwell, A., et al. (2006). Tinkering and Gender in End-User Programmers' Debugging. Proceedings of the ACM CHI 2006, April 22-28, 2006, Montréal, Québec, Canada.

Beguin, P. (2003). Design as a mutual learning process between users and designers. *Interacting with Computers*, 15, 709-730.

Ben-Ari, M. (1999). Bricolage forever. Paper presented at the PPIG 11 Annual Workshop, 4-7 January 1999, University of Leeds.

- Benander, A., Benander, B., & Sang, J. (2004). Factors related to the difficulty of learning to program in Java—an empirical study of non-novice programmers. *Information and Software Technology*, 46, 99–107.
- Bergantz, D., & Hassel, J. (1991). Information relationships in Prolog programs : how do programmers comprehend functionality? *International Journal of Man Machine Studies*, 35, 313-328.
- Bergfeld-Mills, C., Dhiel, V. A., Birkmire, D. P., & Mou, L.-C. (1995). Reading procedural texts: effects of purpose for reading and predictions of reading comprehension models. *Discourse Processes*, 20, 79-107.
- Bergin, S., & Reilly, R. (2005). The influence of motivation and comfort-level on learning to program. Paper presented at the proc. of the 17th workshop of psychology of Programming PPIG 17, Sussex University, June 2005
- Bernard, J.-M. (1994). Analyse descriptive des données planifiées. *Matéhmatiques, Informatique et Sciences Huamines*, 31, 7-96.
- Besnard, D., & Cacitti, L. (2005). Interface changes causing accidents. An empirical study of negative transfer. *International Journal of Human-Computer studies*, 62, 105-125.
- Bétrancourt, M. (2007). L'ergonomie des TICE : quelles recherches pour quels usages sur le terrain ? In B. Charlier & D. Peraya (Eds.), Regards croisés sur la recherche en technologie de l'éducation (pp. 77-89). Bruxelles: De Boeck.
- Bétrancourt, M., & Tversky, B. (2000). Effect of computer animation on user's performance: a review. *Le travail humain*, 63, 311-329.
- Bhavnani, S. K., & John, B. E. (2000). The Strategic Use of Complex Computer Applications. *Human-Computer Interactions*, 15, 107-137.
- Bhavnani, S. K., Reif, F., & John, B. E. (2001). Beyond command knowledge: identifying and teaching strategic knowledge for using complex computer applications. Paper presented at the Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, Seattle, Washington, United States.
- Bibin, L., Lécuyer, A., Burkhardt, J.-M., Delbos, A., & Bonnet, M. (2008). SAILOR: a 3-D medical simulator of loco-regional anaesthesia based on desktop virtual reality and pseudo-haptic feedback. In S. Feiner, D. Thalmann, P. Guitton, B. Fröhlich, E. Kruijff & M. Hachet (Eds.), Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST 2008 (pp. 97-100). Bordeaux, France, October 27-29, 2008: ACM Press.
- Bilavarn, J., Couix, S., Rouillé, M. I., & Burkhardt, J.-M. (2008). Livrable 2.1.2 - Spécification du modèle d'activité humaine (Livrable Projet ANR PERF RV2). Paris: IRISA-Université Paris 5 - UTC.
- Billinghurst, M., Kato, H., & Poupyrev, I. (2001). The magic book: moving seamlessly between reality and virtuality. *Computer Graphics and Applications*, 21, 2-4.
- Bisantz, A. M., & Vicente, K. J. (1994). Making the abstraction hierarchy concrete. *International Journal of Human-Computer Studies*, 40, 83 - 117.
- 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., Figeac-Letang, C., & Falzon, P. (1988). Modeling opportunistic reasonings: the cognitive activity of traffic signal setting technicians (Rapport de recherche No. 898): INRIA.
- Bisseret, A., Sebillotte, S., & Falzon, P. (1999). Techniques pratiques pour l'étude des activités expertes. Toulouse: Octares editions.
- Black, J., Kay, D., & Soloway, E. (1986). Goal and Plan Knowledge Representations: from stories to Text Editors and programm. In J. M. Carroll (Ed.), *Interfacing Thoughts: Cognitive aspects of human computer interaction*. Cambridge: M.I.T. Press.
- Blade, R. A., & Padgett, M. L. (2002). Virtual environments standards and terminology. In K. M. Stanney (Ed.), *Handbook of virtual environments. Design, implementation and applications* (pp. 15-27). Mawah, NJ: Lawence Erlbaum associates.
- Bodker, S., & Gronbaek, K. (1991). Cooperative prototyping: users and designers in mutual activity. *Journal of Man-Machine Studies*, 34, 433-478.

- 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, 169-174.
- Bonnardel, N., & Zenasni, F. (2010). The Impact of Technology on Creativity in Design: An Enhancement? *Creativity and Innovation Management Journal*, 19, 180-191.
- Bonnardel, N. (2009). Activités de conception et créativité : De l'analyse des facteurs cognitifs à l'assistance aux activités de conception créatives. *Le Travail Humain*, 72, 5-22.
- Bonnardel, N. (2006). *Créativité et Conception : Approches cognitives et ergonomiques*. Marseille: Solal Editions.
- Bonnardel, N. (1999). L'évaluation réflexive dans la dynamique de l'activité du concepteur. In J. Perrin (Ed.), *Pilotage et évaluation des activités de conception* (pp. 87-105). Paris: L'Harmattan.
- Bonnardel, N. (1991). Criteria used for evaluation of design solutions. *Designing for Everyone : proceeding of the 11th congress of the International Ergonomics Association*, London.
- Boucheix, J.-M. (2003a). Approche d'ergonomie cognitive des apprentissages en formation professionnelle. *Psychologie Française*, 48, 17-34.
- Boucheix, J.-M. (2003b). Simulation et compréhension de documents techniques : le cas de la formation des grutiers. *Le Travail Humain*, 66, 253-282.
- Boud, C., Baber, C., & Steiner, S. J. (2000). Virtual Reality: a tool for assembly. *PRESENCE: Teleoperators and Virtual Environments*, 9, 486-496.
- Bouthier, D., Pastré, P., & Samurcay, R. (1995). Editorial - le développement des compétences, analyse du travail. *Education Permanente*, 123, 7-12.
- Bovair, S., Kieras, D. E., & Polson, P. G. (1990). The acquisition and performance of text-editing skill: A cognitive complexity analysis. *Human-Computer Interaction*, 5, 1-48.
- Bowman, D., Kruijff, E., LaViola, J., & Poupyrev, I. (2004). *3D User interfaces: Theory and practice*: Addison-Wesley.
- Brangier, E. (2006). Besoin et Interface. In J. Akoka & I. Comyn-Wattiau (Eds.), *Encyclopédie des Nouvelles Technologies* (pp. 1070-1084). Paris: Vuibert.
- Brangier, e., & Barcenilla, J. (2003). Concevoir un produit facile à utiliser. Paris: Editions d'organisation.
- Brooks, R. (1977). Towards a theory of the Cognitive Processes in Computer Programming. *International Journal of Man-Machine studies*, 9, 737-751.
- Brown, D. J., Kerr, S., & Wilson, J. R. (1997). Virtual environments in special needs education. *Communication of the ACM*, 40, 72-75.
- Bruckman, A., & Resnick, M. (1995). The MediaMOO Project: Constructionism and Professional Community. *Convergence*, 1, 94-109.
- Bruillard, E. (1997). *Les machines à enseigner*. Paris: édition Hermès.
- 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.
- Buche, C., Querrec, R., Loor, P. D., & Chevaillier, P. (2003). MASCARET: Pedagogical Multi-Agents System for Virtual Environment for Training. In Proceedings of the 2003 international Conference on Cyberworlds, December 03 - 05, 2003, Washington, DC.
- Burdea, G., & Coiffet, P. (1993). *La réalité virtuelle*: Hermès science.
- Burkhardt, J.-M. (1997). Réutilisation de solutions en conception orientée-objet : un modèle cognitif des mécanismes et représentations mentales. Thèse de Doctorat, Paris V René Descartes.
- Burkhardt, J.-M. (2002). E-Learning : a cognitive ergonomics approach. Fourth European ENOP Postgraduate Summerschool "Information technology, Work and organisational psychology".
- Burkhardt, J.-M. (2003a). L'utilisation de véhicules sur un site étendu d'entreprise : une contribution ergonomique à l'analyse des besoins pour la mise en service de véhicules automatisés en libre-service (Technical Report). Rocquencourt: INRIA.

- Burkhardt, J.-M. (2003b). Réalité virtuelle et ergonomie : quelques apports réciproques. *Le Travail Humain*, 66, 65-91.
- Burkhardt, J.-M. (2004). La mise au point de dispositifs haptiques et visuo-haptiques : une approche de l'évaluation adaptée de la psychophysique. Communication aux journées de l'AS Haptique du CNRS, Montpellier.
- Burkhardt, J.-M. (2005). Evaluation Methods in User-Centred Design of Virtual Environments: current practices and some perspectives in Cognitive Ergonomics. In proceedings of the 2nd INTUITION workshop, Compiègne.
- Burkhardt, J.-M. (2006a). Ergonomie de l'interaction dans les environnements virtuels d'apprentissage. Actes des 4ième Ecole thématique CNRS EIAH « Simulation, réalité virtuelle et augmentée pour l'apprentissage ».
- Burkhardt, J.-M. (2006b). Ergonomie, Facteurs Humains et Réalité Virtuelle. In P. Fuchs, G. Moreaux, A. Berthoz & J.-L. Vercher (Eds.), *Le traité de la Réalité Virtuelle* (Vol. 1, pp. 117-150). Paris: Les presses de l'école des mines de Paris.
- Burkhardt, J.-M. (2006c). Prise en compte de la dimension apprentissage en Ergonomie des NTIC. Séminaire Erasmus Université Paris 5 / Université de Porto / CNAM.
- Burkhardt, J.-M. (2007). Immersion, représentation et collaboration : discussion et perspectives empiriques pour l'ergonomie cognitive de la Réalité Virtuelle. *Intellectica*, 45, 59-87.
- Burkhardt, J.-M. (2009). Conception ergonomique centrée-apprentissage dans les environnements virtuels pour la formation. Actes de la Conférence EIAH 2009, Le Mans.
- 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., & Détienne, F. (1994). La réutilisation en génie logiciel : une définition d'un cadre théorique en ergonomie cognitive. Actes de la conférence ERGO.IA '94, 26-28 octobre, Biarritz.
- Burkhardt, J.-M., & Détienne, F. (1995a). An empirical study of software reuse by experts in object-oriented design. Proceedings of Interact'95, 27-29 June 1995, Lillehammer Norway.
- Burkhardt, J.-M., & Détienne, F. (1995b). La réutilisation de solutions en conception de programmes informatiques. *Psychologie Française*, 40, 85-98.
- Burkhardt, J.-M., Détienne, F., & Hebert, A.-M. (2008). Vers l'évaluation de la qualité de la collaboration en conception assistée par les technologies de l'Information et de la Communication (Rapport de fin de contrat FTR&D CRE 46133216). Paris: Université Paris Descartes & INRIA Rocquencourt.
- Burkhardt, J.-M., Détienne, F., Hebert, A.-M., & Perron, L. (2009). Assessing the “quality of collaboration” in technology-mediated design situations with several dimensions. Proceedings of Interact 2009, Upsala, 26-28 august.
- Burkhardt, J.-M., Détienne, F., Hebert, A.-M., Perron, L., Safin, S., & Leclercq, P. (2009). An approach to assess the quality of collaboration in technology-mediated design situations. In proceedings of the European Conference on Cognitive Ergonomics ECCE 2009, 30 September - 2 October 2009 in Otaniemi, Helsinki.
- Burkhardt, J.-M., Détienne, F., Motsinga-Mpaga, L., Perron, L., Leclercq, P., & Safin, S. (2008a). Conception architecturale collaborative avec un « bureau augmenté » : une étude exploratoire de l'effet de la distance et de la co-localisation. Actes 43e Congrès de la SELF, 17-18-19 septembre 2008 Ajaccio.
- Burkhardt, J.-M., Détienne, F., Motsinga-Mpaga, L., Perron, L., Leclercq, P., & Safin, S. (2008b). Multimodal collaborative activity among architectural designers using an augmented desktop at distance or in collocation. In J. Abascal, I. Fajardo & I. Oakley (Eds.), ECCE '08: Proceedings of the 15th European conference on Cognitive ergonomics (pp. 1-4). Funchal, Portugal: ACM.
- Burkhardt, J.-M., Detienne, F., & Wiedenbeck, S. (1997). Mental Representations Constructed by experts and novices in Object-Oriented Program Comprehension. Paper presented at the proceeding of INTERACT'97, 14th-18th July 1997, Sydney, Australia.
- Burkhardt, J.-M., Détienne, F., & Wiedenbeck, S. (1998). The effect of object-oriented programming expertise in several dimensions of comprehension strategies. In proceedings of IWPC'98 (International Workshop on Program Comprehension), 24-26 juin 1998, Ischia Italy : IEEE press.

- Burkhardt, J.-M., Détienne, F., & Wiedenbeck, S. (2002). Object-oriented Program Comprehension: Effect of Expertise, Task and Phase. *Empirical Software Engineering : an International Journal*, 7, 115-156.
- Burkhardt, J.-M., Domlan, F., Plot, E., & Laulagnet, G. (2007). Analyse des besoins et des caractéristiques des utilisateurs finaux pressentis autour du scenario " chargement de produits blancs" (Livrable du SP 1.1. – Projet ANR V3S (Virtual Reality for Safe Seveso Substractors). Paris: Université Paris Descartes.
- Burkhardt, J.-M., Girard, C., Ben Ayed, A., & Lourdeaux, D. (2008). Répertoire des modes opératoires et des déterminants de l'activité des intervenants sous-traitants (Livrable SP1.4 Projet V3S). Paris: Université Paris Descartes.
- Burkhardt, J.-M., Girard, C., Ben Ayed, A., Lourdeaux, D., & Niogret, J.-C. (2009). Objectifs pédagogiques et difficultés d'apprentissage dans la planification, le suivi et la gestion d'activités sous-traitées: résultats (Technical Rapport No. Livrable SP1.3 Projet V3S). Paris: Université Paris Descartes.
- Burkhardt, J.-M., Lourdeaux, D., Couix, S., & Rouillé, M. (2009). La modélisation de l'activité humaine finalisée. In P. Fuchs, G. Moreau, S. Donikian & C. Andriot (Eds.), *Le Traité de la Réalité virtuelle : l'humain virtuel*. Paris: Presses de l'école des Mines de Paris.
- Burkhardt, J.-M., Lourdeaux, D., & Fuchs, P. (1999). Conception d'un système de RV pour la formation des ADC aux opérations en milieu ferroviaire. In actes des Journées Réalité Virtuelle et Cognition, Paris, 14-15 décembre 1999.
- Burkhardt, J.-M., Lourdeaux, D., & Lequatre, F. (2005). Environnements Virtuels pour l'Apprentissage : de l'image d'Epinal à la réalité des usages et des configurations socio-techniques. In actes de IHM 2005, September 27-30, Toulouse France.
- Burkhardt, J.-M., Lourdeaux, D., & Mellet d'Huart, D. (2006). La réalité virtuelle pour l'apprentissage humain. In P. Guittot (Ed.), *Le Traité de la Réalité Virtuelle* (Vol. 4). Paris: Presses de l'Ecole des Mines de Paris.
- Burkhardt, J.-M., Lourdeaux, D., & Mellet d'Huart, D. (2003). La conception des environnements virtuels d'apprentissage. In P. Fuchs & G. Moreau (Eds.), *Le traité de la réalité virtuelle* (Vol. 2, pp. 207-296). Paris: presses de l'école des Mines.
- Burkhardt, J.-M., Michel, G., Ronca, L., & Sperandio, J.-C. (1998). L'apport de l'ergonomie aux nouvelles technologies éducatives : la formation médicale virtuelle. In actes de NTICF'98 (Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication dans la Formation), Rouen, 18-20 Novembre 1998.
- Burkhardt, J.-M., Perron, L., & Plénacoste, P. (2006). Ergonomie de l'interface et de l'interaction. In P. Fuchs, G. Moreau, J.-M. Burkhardt & S. Coquillart (Eds.), *Le traité de la réalité virtuelle* (Vol. 2). Paris: Presse de l'école des mines de Paris.
- Burkhardt, J.-M., Specht, M., & Sperandio, J.-C. (1999). Processus d'apprentissage dans l'utilisation d'internet chez les personnes âgées (Rapport LEI-CDC /MIR/CNAM). Paris: Laboratoire d'Ergonomie Informatique, université Paris V.
- Burkhardt, J.-M., & Sperandio, J.-c. (2004). Ergonomie et conception informatique. In P. Falzon (Ed.), *Ergonomie* (pp. 437-450). Paris: PUF.
- Burkhardt, J.-M., & Wolff, M. (2002). Réalité virtuelle et nouvelles technologies en formation : vers une formalisation des critères de choix et de la démarche centrée sur l'apprentissage (rapport de fin de contrat SNCF-LEI). Paris: Université Paris 5 Laboratoire d'Ergonomie Informatique.
- Burkhardt, J.-M., & Wolff, M. (2003). Comparing designers' viewpoints in simulation and virtual reality. In proceedings of the International Ergonomics Association conference, Korea, Seoul, august 2003.
- Burkhardt, J.-M. (2004b). L'Ergonomie dans la conception des technologies et des situations d'apprentissage. 2nde Ecole d'été CNRS EIAH « Technologie d'apprentissage et cognition ».
- Burkhardt, J. M., Specht, M., Ronca, L., & Michel, G. (1998). Compte-rendu de la première évaluation de la maquette GRUV auprès de médecins (Rapport No. LEI-98.07.01.). Paris: Laboratoire d'Ergonomie Informatique.
- Byckling, P., & Sajaniemi, J. (2005). Using Roles of Variables in Teaching: Effects on Program Construction. 17 th workshop of the Psychology of Programming Interest Group PPIG 17, University of Sussex, june 2005.
- 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.

- Cadoz, C. (1994). Les réalités virtuelles: Flammarion.
- Carbadella, G. (1997). La contribution des ergonomes à l'analyse et à la transformation de l'organisation du travail. Thèse de doctorat en Ergonomie, CNAM, Paris.
- Card, S., Moran, T., & Newell, A. (1983). *The Psychology of Human-Computer Interaction*. Hillsdale, New Jersey: Laurence Erlbaum Associates.
- Carroll, J. M. (1990). *The Nurnberg Funnel: Designing Minimalist Instruction for Practical Computer Skill*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Cau-Bareille, D., Delgoulet, C., & Gaudart, C. (2006). When learning difficulties and specificities of older workers stand to show training deficiencies. When learning difficulties and specificities of older workers. Proceedings of the 16th Triennial World Conference of the International Ergonomics Association, Maastricht, The Netherlands, 10-14, July.
- Caudell, T., & Mizell, D. (1992). Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences.
- Cazeaux, E., Devillers, F., Saint-Romas, C., Arnaldi, B., Maffre, E., Mollet, N., et al. (2005). Giat virtual training formation à la maintenance. In proceedings of Virtual Reality International Conference VRIC, Laval, France.
- Chalon, R. (2004). Réalité mixte et travail collaboratif : IRVO, un modèle de l'Interaction Homme-Machine. Thèse de doctorat en informatique de l'Ecole Centrale de Lyon, Lyon.
- Charness, N., Kelley, C. L., Bosman, E. A., & Mottram, M. (2001). Word-processing training and retraining: Effects of adult age, experience, and interface. *Psychology and Aging*, 16, 110-127.
- Chatel, S. (1997). L'acquisition d'un langage de programmation orienté-objet : Smalltalk 80. Thèse de Doctorat, spécialité Psychologie Cognitive, Université Paris VIII Saint-Denis.
- Chatel, S., & Détienne, F. (1996). Strategies in object-oriented design. *Acta Psychologica*, 91, 245-269.
- Chevalier, A. (2007). Stakeholders' influence on the importance of users' and client's information and constraints during website design. *Psychological Reports*, 101(945-951).
- Chi, M. T. H., Siler, S. A., Jeong, H., Yamauchi, T., & Haussman, R. G. (2001). Learning from human tutoring. *Cognitive Science*, 25, 471-533.
- Christoffersen, K., Hunter, C. N., & Vicente, K. J. (1998). A longitudinal study of the effects of ecological interface design on deep knowledge. *International Journal of Human-Computer Studies*, 48, 729 —762
- Churchill, E. F., N.Snowdon, D., & Munro, A. J. (Eds.). (2001). *Collaborative Virtual Environments: Digital Places and Spaces for Interaction*. London: Springer Verlag.
- Clark, D. B., Sampson, V., Weinberger, A., & Erkens, G. (2007). Analytic Frameworks for Assessing Dialogic Argumentation in Online Learning Environments. *Educational Psychology Review*, 19, 343-374.
- Conein, B. (2004). Communautés épistémiques et réseaux cognitifs : coopération et cognition distribuée. *Revue d'Economie Politique*, 113, 141-159.
- Cooperstock, J. R. (2001). Classroom of the future: enhancing education through augmented reality. In M. J. Smith, G. Salvendy, D. Harris & R. J. Koubek (Eds.), *Usability evaluation and interface design: cognitive engineering, intelligent agents and virtual reality* (pp. 688-692). Mahwah, NJ Lawrence Erlbaum Associates.
- Coughan, J., & Macredie, R. D. (2002). Effective communication in requirements elicitation: A comparison of methodologies. *Requirements Engineering*, 7, 47-60.
- Couix, s. (2007). Analyse des usages et de la construction des modèles de tâches chez les ergonomes (Mémoire de Master Recherche en Ergonomie). Paris: Université Paris Descartes.
- Couix, S., & Burkhardt, J.-M. (2007). Résultats de l'analyse ergonomique de l'activité finalisée (Livrable 2.1.1). Paris: Projet PERFRV2 Université Paris 5.
- Couix, S., Burkhardt, J. M., Donikian, S., & Rouillé, M. (2007). Etat de l'art sur les modèles de tâches pour la génération d'opérateurs virtuels au travail (Livrable projet ANR-PERFRV2). Paris, Rennes: Université Paris Descartes et INRIA.
- Curtis, B. (1989). Cognitive issues in reusing Software artifacts. In A. J. Perlis (Ed.), *Software Reusability: Applications and Experience* (Vol. 2, pp. 269-287). New York: ACM Press.

- Curtis, P., & Nichols, D. (1993). MUDs Grow Up: Social Virtual Reality in the Real World. Palo Alto: Xerox.
- Czaja, S. J., Hammond, K., Blascovich, J. J., & Swede, H. (1989). Age related differences in learning to use a text-editing system. *Behaviour & Information Technology*, 8, 309-319.
- D'Astous, P., Détienne, F., Robillard, P. N., & Visser, W. (1997). Technical review Meetings: a Framework for Cognitive Analysis. In proceedings of Empirical Studies of Programmers 7, Washington D.C. USA, october 24-26 1997.
- D'Astous, P., Détienne, F., Robillard, P. N., & Visser, W. (2001). Quantitative measurements of the influence of participants roles during peer review meetings. *Empirical Software Engineering : an International Journal*, 6, 143-159.
- D'Astous, P., Détienne, F., Visser, W., & Robillard, P. N. (2004). Changing our view on design evaluation meetings methodology: a study of software technical evaluation meetings. *Design Studies*, 25, 625-655.
- Da Dalto, L., Balet, O., Duchon J, & Mellet-d'Huart, D. (2005). CS WAVE: Virtual Reality for Welders. In proceedings of the Workshop on Virtuality Structure, CDrom Proceedings IEEE VR 2005, Bonn, March 12–16.
- Damodaran, L. (1996). User involvement in the systems design process : a practical guide for users. *Behaviour & Information Technology*, 15, 363-377.
- Darses, F. (1992). Mécanismes cognitifs de gestion de contraintes dans la résolution de problèmes de conception. In Actes de la conférence ErgoIA 92, Biarritz.
- Darses, F. (2009). Résolution collective des problèmes de conception. *Le Travail Humain*, 72, 43-59.
- Darses, F. (Ed.). (2001). 10 ième Atelier du Travail Humain "modéliser les activités coopérative de conception" Paris: INRIA.
- Darses, F., & Reuzeau, F. (2004). Participation des utilisateurs à la conception des systèmes et des dispositifs de travail. In P. Falzon (Ed.), Ergonomie (pp. 405-420). Paris, France: Presse Universitaire de France.
- Davies, R. C. (2002). Applications of systems design using virtual environments. In K. M. Stanney (Ed.), Handbook of virtual environments (pp. 1079-1100). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum associates.
- Davies, S. (1991). The role of notation and knowledge representation in the determination of programming strategy : a framework for integrating modes of programming behavior. *Cognitive Science*, 15, 547-572.
- Davies, S. P. (1994). Knowledge restructuring and the acquisition of programming expertise. *International Journal of Human-Computer Studies*, 40, 703-726.
- Davies, S. P., & Castell, A. M. (1992). Doing Design and describing it : accounting for divergent Perspectives in Software Design. In proceedings of the 5th Workshop of the Psychology of Programming Interest Group, Paris: INRIA.
- Davis, S., & Wiedenbeck, S. (1998). The effect of interaction style and training method on end user learning of software packages. *Interacting with Computers*, 11, 147 – 172
- Davis, S., & Wiedenbeck, S. (2001). The mediating effects of intrinsic motivation, ease of use and usefulness perceptions on performance in first time and subsequent computer users. *Interacting with Computers*, 13, 549-580.
- de la Garza, C., & Burkhardt, J.-M. (2001). Modalités d'utilisation "et d'apprentissage de l'Internet par les aînés : le cas du site de la SNCF et de la CDC (rapport final du contrat MIRE-CNAV/SNCF/CDC). Paris: LEI université Paris 5.
- de la Garza, C., & Burkhardt, j.-m. (2002). L'apprentissage et l'utilisation de l'Internet par les aînés, une question d'expertise et d'utilité plus que d'âge : le cas du site de la SNCF et de la CDC. In C. G. F. Bouchayer, A. Rozenkier (Ed.), Les techniques de la vie quotidienne : âges et usages. Paris: MiRe-DREES / CNAV.
- De La Garza, C., Burkhardt, J.-M., & Specht, M. (1999). Utiliser Internet : aspects d'apprentissage et de formation pour les personnes de plus de 50 ans (Rapport d'étape). Paris: Laboratoire d'Ergonomie Informatique de l'université Paris 5.
- de la Garza, C., Sperandio, J.-C., & Specht, M. (1999). L'utilisation réelle des objets techniques du quotidien par les personnes âgées. *Réseaux*, 17, 97 - 120

- De la Garza, C., & Stocker, V. (2003). De la conception participative à la conception « centrée utilisateur ». Apports de l'ergonomie pour l'amélioration du processus de conception et d'évolution des logiciels: Rapport final Etude CNAM/CPAM – Paris 5, janvier 2003.
- De Montmollin, M. (1974). L'analyse du travail préalable à la formation. Paris: Armand colin.
- de Mul, S., & van Oostendorp, H. (1996). Learning user interfaces by exploration. *Acta Psychologica*, 91, 325-344.
- de Souza, C. S., & Preece, J. (2004). A framework for analyzing and understanding online communities. *Interacting with Computers*, 16, 579-610.
- de Tersac, G. (1996). Le travail de conception, de quoi parle-t-on? In E. Friedberg (Ed.), Coopération et conception (pp. 1-22). Toulouse: Octares editions.
- De Vries, E. (2001). Les logiciels d'apprentissage : panoplie ou éventail ? *Revue Française de Pédagogie*, 137, 105-116.
- Debeugny, C., & Burkhardt, J.-M. (2003). Interventions d'aide entre le formateur et les élèves seniors dans une formation à l'informatique. In actes de EPIQUE 2003, Boulogne Billancourt, 2-3 octobre, France.
- Dede, C., Salzman, M., & Loftin, B. (1996a). The Development of a Virtual World for Learning Newtonian Mechanics. In P. Brusilovsky, P. Kommers & N. Streitz (Eds.), Multimedia, Hypermedia, and Virtual Reality (pp. 87-106). Berlin: Springer.
- Dede, C., Salzman, M. C., & Loftin, R. B. (1996b). ScienceSpace : research on using virtual reality to enhance science education. In proceedings of conference ED-MEDIA 96, Boston.
- Delgoulet, C. (2001). La construction des liens entre situations de travail et situations d'apprentissage dans la formation professionnelle. *Pistes*, 3(2).
- Delgoulet, C., & Marquié, J.-C. (1998). Analyse de la relation Vieillissement et Formation professionnelle. In actes du colloque "Ergonomie et recherche", Toulouse.
- Demazière, D., Horn, F., & Zune, M. (2007). Des relations de travail sans règles? l'énigme de la production de logiciels logiciels libres. *Sociétés contemporaines*, 66, 101-125.
- Détienne, F. (1986). Program understanding and knowledge organization: the influence of acquired schemata. In proceedings of the third European conference on Cognitive Ergonomics, Paris, september 15-20.
- Détienne, F. (1991). Reasoning from a schema and from an analog in software code reuse. In proceedings of the Empirical Studies of Programmers: 4th workshop, Norwood, NJ.
- Détienne, F. (1997). Assessing the cognitive consequences of the object-oriented approach: a survey of empirical research on object-oriented design by individuals and teams. *Interacting with Computers*, 9, 47-72.
- Détienne, F. (2002). Software Design: Cognitive aspects. London: Springer Verlag.
- Détienne, F. (2006). Collaborative design: managing task interdependencies and multiple perspectives. *Interacting With Computers*, 18, 1–20.
- Détienne, F., Barcellini, F., & Burkhardt, J.-M. (in press). La conception dans les communautés en ligne : questionnements thématiques et méthodologiques sur ces nouvelles pratiques. In G. Vallery & M. Zouinar (Eds.), Ergonomie et nouvelles technologies.
- Détienne, F., Boujut, J.-F., & Hohmann, B. (2004). Characterization of Collaborative Design and Interaction Management Activities in a Distant Engineering Design Situation. In F. Darses, R. Dieng, C. Simone & M. Zaklad (Eds.), Cooperative Systems design (pp. 83-98). Amsterdam, The Netherlands: IOS Press.
- Détienne, F., & Burkhardt, J.-M. (2001). Des aspects d'ergonomie cognitive dans la réutilisation en génie logiciel. *TSI - Hermes*, 20, 461-487.
- Détienne, F., Burkhardt, J.-M., & Barcellini, F. (2006). Open source software communities: current issues. *CSI Communications (Computer Society of India)*, 30, 12-16.
- Détienne, F., Burkhardt, J.-M., Hebert, A.-M., & Perron, L. (2008). Assessing the quality of collaboration in design: bridging Cognitive Ergonomics and CSCL approaches. In Workshop "CSCW and Human Factors - Where are we now and what are the challenges?" associated to the 2008 ACM conference on Computer Supported Cooperative Work, 8-12 november, San Diego CA U.S.

Détienne, F., Burkhardt, J.-M., & Visser, W. (2003). Cognitive effort in collective software design: Methodological perspectives in cognitive ergonomics. In Proceedings of the 2nd Workshop in the Workshop Series on Empirical Software Engineering "The Future of Empirical Studies in Software Engineering", Monte Carcio Catone, Italy, Sept 29.

Détienne, F., Martin, G., & Lavigne, E. (2005). Viewpoints in co-design: a field study in concurrent engineering. *Design Studies*, 26, 215-241.

Détienne, F., Rouet, J.-F., Burkhardt, J.-M., & Deleuze-Dordron, C. (1996). Reusing processes and documenting processes: toward an integrated framework. In proceedings of the european conference on cognitive ergonomics ECCE8'96, Grenada, Spain.

Dillenbourg, P., Baker, M. J., Blaye, A., & O'Malley, C. (1996). The evolution of research on collaborative learning. In P. Reimann & H. Spada (Eds.), *Learning in Humans and Machines: Towards an Interdisciplinary Learning Science* (pp. 189-211). Oxford: Pergamon.

Dillenbourg, P., Poirier, C., & Carles, L. (2003). Communautés virtuelles d'apprentissage: e-jargon ou nouveau paradigme ? In A. Taurisson & A. Sentini (Eds.), *Pédagogies.Net*. Montréal: Presses Universitaires du Quebec.

Dix, A., Finley, J., Abowd, G., & Beale, R. (1998). *Human-computer interaction*. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall inc.

Dominjon, L., Lecuyer, A., Burkhardt, J.-M., Andrade-Barroso, G., & Richir, S. (2005). The "Bubble" Technique: Interacting with Large Virtual Environments Using Haptic Devices with Limited Workspace. In proceedings of the World Haptic Conference 05 Pisa Italy.

Dominjon, L., Lecuyer, A., Burkhardt, J.-M., Andrade-Barroso, G., & Richir, S. (2006). Hybrid Rotations: Overcoming Hardware Rotational Limitations of Force-Feedback Devices. In proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference Alexandria, Virginia USA, 25-29 march 2006.

Dominjon, L., Lecuyer, A., Burkhardt, J.-M., Richard, P., & Richir, S. (2005). Influence of Control/Display Ratio on the Perception of Mass of Manipulated Objects in Virtual Environments. In proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference Bonn Germany, 12-16 march 2005.

Dominjon, L., Lécuyer, A., Burkhardt, J.-M., & Richir, S. (2006). A Comparison of Three Techniques to Interact in Large Virtual Environments Using Haptic Devices with Limited Workspace. In proceedings of Advances in Computer Graphics, 24th Computer Graphics International Conference, CGI 2006, Hangzhou, China, June 26-28, 2006.

Dondero, R. M., & Wiedenbeck S. (2006). Subsetability As a New Cognitive Dimension. In Proc. Psychology of Programming Interest Group: PPIG 2006, Brighton, UK, Sept 7-8.

Dorn, B., Tew, A. E., & Guzzial, M. (2007). Introductory Computing Construct Use in an End-User Programming Community. In VL/HCC'07: Proceedings of the IEEE Symposium on Visual Languages and Human Centric Computing, Coeur d'Alène, Idaho, USA 23-27 september.

Draper, S. W. (1998). Practical problems and proposed solutions in designing action-centered documentation. In T. Anson, S. Draper & J.-M. Carroll (Eds.), *Minimalism beyond the Nurnberg funnel* (pp. 349-374). Cambridge: MIT Press.

Drasic, D., & Milgram, P. (1996). Perceptual issues in augmented reality. In S. S. Fisher, M. T. Bolas & J. O.Merritt (Eds.), *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems III* (pp. 123–134). San Jose, CA: SPIE.

Druin, A. (2002). The role of children in the design of new technology. *Behavior & Information Technology*, 21, 1-25.

Dubois, E. (2001). Chirurgie Augmentée : un Cas de Réalité Augmentée ; Conception et Réalisation Centrée sur l'Utilisateur. Thèse de doctorat de 3eme cycle, Joseph Fourier University, Grenoble,.

Ducheneaut, N. (2005). Socialization in an Open Source Software Community: A Socio-Technical Analysis. *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, 14, 323-368.

Dufoyer, J. P. (1989). Un protocole d'évaluation ergonomique et pédagogique des didacticiels. In V. De Keyser & A. Van Daele (Eds.), *L'ergonomie de conception*. Bruxelle: De Boeck Université.

Durey, D. (1960). Formation professionnelle fondée sur l'analyse du travail. La formation des mécanographes. *Psychologie Française*, 5, 187-212.

- Edward, L., Lourdeaux, D., Lenne, D., Barthès, J.-P., Burkhardt, J.-M., & Camus, F. (2006). Multi-Agents Approach for Modelling Safety Interventions on a SEVESO Site through Virtual Reality. In Proceedings of Virtual Concept 2006, Cancún, Mexico, November 27th – December 1st, 2006.
- Ehrlich, M.-F., & Tardieu, H. (1993). Modèles mentaux, modèles de situation et compréhension de textes. In M. Cavazza (Ed.), *Les modèles mentaux : approche cognitive des représentations* (pp. 47-74). Paris: Masson.
- Ellis, C. A., Gibbs, S. j., & Rein, G. L. (1991). Groupware: some issues and experiences. *Communications of the ACM*, 34, 38-58.
- Fabre, D., Couix, S., Burkhardt, J.-M., Gounelle, C., & Cabon, P. (2006). Virtual Reality to support human factors for safety: where we are and where we (aim to) go. In international conference ESREL - Safety and Reliability Annual Conference, 18-22 september, Estoril, Portugal.
- Falzon, P. (1994). Dialogues fonctionnels et activité collective. *Le Travail Humain*, 57, 297-312.
- Falzon, P., & Darses, F. (1996). La conception collective : une approche de l'ergonomie cognitive. In E. Friedberg (Ed.), *Coopération et Conception* (pp. 123-135). Toulouse: Octares editions.
- Falzon, P., & Teiger, C. (1999). Ergonomie et Formation. In P. Carré & P. Caspar (Eds.), *Traité des sciences et techniques de la formation* (pp. 145-164). Paris: Dunod.
- Faverge, J.-M. (1976). L'ergonomie vue par les ergonomes. *Le travail Humain*, 39, 299-310.
- Fencott, C. (1999). Towards a design methodology for virtual environments. Paper presented at the Workshop "User-centred design and implementation of virtual environments", York, England 1999.
- Férey, N., Bouyer, G., Martin, C., Bourdot, P., Nelson, J., & Burkhardt, J.-M. (2008). User needs analysis to design a 3D multimodal protein-docking interface. In proceedings of the IEEE Symposium on 3D User Interfaces 2008, March 8-9 2008 Reno, Nevada USA.
- Férey, N., Bouyer, G., Martin, C., Drif, A., Bourdot, P., Ammi, M., et al. (2009). Docking de protéines en Réalité Virtuelle : une approche hybride et multimodale. *Technique et Science Informatique*, 28, 983-1015.
- Férey, N., Nelson, J., Martin, C., Picinali, L., Bouyer, G., Tek, A., et al. (2009). Multisensory VR interaction for Protein-Docking: The CoRSAIRe project. *Virtual Reality*, 13, 273-293.
- Fischer, G. (2007). Meta-Design: Expanding Boundaries and Redistributing Control in Design. In proceedings of the International Conference on Human-Computer Interaction INTERACT 2007, Rio de Janeiro, Brazil, 10-14 september.
- Følstad, A., & Rahlff, O.-W. (2005). Challenges in Conducting User-Centered Evaluations of Mobile Services. In proceedings of the HCII 2005 Human-Computer Interaction International Conference.
- Foster Jr, S. T., & Franz, C. R. (1999). User involvement during information systems development : a comparison of analyst and user perceptions of system acceptance. *Journal of Engineering and Technology Management*, 16, 329 – 348.
- Fournier, P.-S. b. (2004). Concevoir une formation : réflexion sur une démarche d'aide à l'apprentissage sur le cours de vie. *Pistes*, 6, 1-13.
- Frejus, M. (1998). Evaluation of a virtual environment-based training tool through trainer-trainees interaction analysis. In proceedings of the european conference on cognitive ergonomics ECCE-9, University of Limerick, Ireland August 24-26.
- Frejus, M., Drouin, A., Thibault, G., & Schmid, A. (1997). Conception de systèmes de réalité virtuelle pour la formation d'agents de maintenance. Inactes du XXXII ème congrés de la SELF, Lyon 1997.
- Fuchs, P., & Burkhardt, J.-M. (2003). Approche théorique et pragmatique de la réalité virtuelle. In P. Fuchs & G. Moreau (Eds.), *Le traité de la réalité virtuelle* (Vol. 1, pp. 53-104). Paris: Presses de l'Ecole des Mines de Paris.
- Fuchs, P., Moreau, G., & Papin, J.-P. (Eds.). (2003). *Traité de la Réalité Virtuelle*. Paris: Presse de l'Ecole des Mines de Paris.
- Fuchs, P., & Moreaux, G. (Eds.). (2006). *Le traité de la Réalité Virtuelle*. Paris: 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. In proceedings of the "Virtual reality and prototyping", premières rencontres internationales de la réalité virtuelle de Laval, Laval, juin 1999.
- Fuchs, P., & Richir, S. (2006). La méthode I2I : « Interaction et Immersion pour l'Innovation. In Encyclopédie des Techniques de l'Ingénieur (Vol. TE5910).
- Gabbard, J. L., Hix, D., & Swan II, J. E. (1999). User-centered design and evaluation of virtual environments. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 19, 51 - 59.
- Gabbard, J. L., Swan II, J. E., Hix, D., Lanzagorta, M., Livingston, M., Brown, D., et al. (2002). Usability Engineering: Domain Analysis Activities for Augmented Reality Systems. Paper presented at the Proceedings of the Conference on The Engineering Reality of Virtual Reality 2002.
- Gacek, C., & Arief, B. (2004). The Many Meanings of Open Source. *IEEE Software*, 21, 34-40.
- 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. In actes du XXXII ème congrès de la SELF, Lyon, 17-19 septembre 1997.
- Garner, S., Haden, P., & Robins, A. (2005). My Program is Correct But it Doesn't Run: A Preliminary Investigation of Novice Programmers' Problems. In proceedings of the Australasian Computing Education Conference 2005, Newcastle, Australia.
- Gaudart, C. (2000). Quand l'écran masque l'expérience des opérateurs vieillissants : changement de logiciel et activité de travail dans un organisme de services. *Pistes*, 2(2).
- Gaudart, C., & Weill-Fassina, A. (1999). L'évolution des compétences au cours de la vie professionnelle : une approche ergonomique. *Formation emploi*, 67, 47-62.
- George, C. (1983). Aprendre par l'action. Paris: PUF.
- Gick, M. L., & Holyoak, K. (1983). Schema Induction and Analogical Transfer. *Cognitive Psychology*, 15, 1-38.
- Gillet, B. (1973). Améliorer la formation professionnelle par l'étude du travail. Paris: Les éditions d'organisation.
- Gilmore, D. (1990). Expert programming knowledge : a strategic approach. In D. Gilmore (Ed.), *Psychology of Programming* (pp. 223-234): Academic Press.
- Gilmore, D., Winder, R., & Détienne, F. (Eds.). (1994). *User Centred requirements for Software Engineering environments*: Springer Verlag.
- Girard, C., Delgoulet, C., & Burkhardt, J.-M. (2009). Analyse des besoins et prise en compte des dimensions humaines et socio-techniques pour la spécification d'un simulateur pour la formation collective à la gestion de crise NRBC (Livrable Projet SAGECE L1.v4). Paris: ECI Université Paris Descartes.
- Goel, V. (1992). Comparison of well-structured and ill structured task environments and problem spaces. In Proceedings of the 14th annual conference of the cognitive science society. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Good, J., & Robertson, J. (2006). CARSS: a framework for learner-centred design with children. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 16, 381-413.
- Gounelle, C., Cabon, P., Burkhardt, J.-M., Couix, S., Fabre, D., Anastassova, M., et al. (2007). Integrating Human Factors approaches with Virtual Reality for Safety : the Virthualis project. In proceedings of the Virtual Reality International Conference VRIC, 18-20 April Laval, France.
- Gray, W. (2000). The Nature and Processing of Errors in Interactive Behavior. *Cognitive Science*, 24, 205–248.
- Green, T. (1997). Cognitive Approaches to Software Comprehension: Results, Gaps and Limitations. In Workshop on Experimental Psychology in Software Comprehension Studies, University of Limerick, Ireland.
- Green, T., Petre, M., & Bellamy, R. (1991). Comprehensibility of Visual and Textual Programs: The Test of Superlativism Against the ``Match-Mismatch'' Conjecture. In Empirical Studies of Programmers: Fourth Workshop, Ablex Publishing Corporation.
- Green, T. R. G. (1989). Cognitive dimensions of notations. In L. Macaulay (Ed.), *People and Computers V*: Cambridge University Press.

- Green, W., Gyi, D. E., Kalawsky, R., & Atkins, D. (2006). A contextual Enquiry: Studying User Requirements for Future Home Technology. Meeting Diversity in Ergonomics. Proceedings of the 16th Congress of the International Ergonomics Association, Maastricht, The Netherlands, 10th – 14th July 2006.
- Gronier, G. (2006). Psychologie ergonomique du travail collectif assisté par ordinateur : l'utilisation du collecticiel dans les projets de conception de produits. Thèse de doctorat de Psychologie Ergonomique, Université de Franche-Comté, Besançon.
- Grosjean, J., Burkhardt, J.-M., Coquillart, S., & Richard, P. (2002). Evaluation of the Command and Control Cube. IEEE 4th International Conference on Multimodal Interfaces, October 14-16 200, Pittsburgh PA USA.
- Grundin, J. (1991). Systematic sources of suboptimal interface design in large product development organizations. *Human Computer Interaction*, 6, 147 - 196.
- Guindon, R. (1990a). Designing the Design process : Exploiting Opportunistic Thoughts. *Human Computer Interaction*, 5, 305-344.
- Guindon, R. (1990b). Knowledge exploited by experts during software System Design. *International Journal of Man-Machine Studies*, 33, 279-304.
- Guttermoen 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, 235-253.
- Guzdial, M., Kafai, Y. B., Carroll, J. B., Fischer, G., Shank, R., & Soloway, E. (1995). Learner-Centered System Design: HCI Perspective for the Future. In proceedings of the Symposium on Designing Interactive Systems - DIS 95, Ann Arbor MI USA.
- Gwizdka, J., & Chignell, M. (2004). Individual differences and task-based user interface evaluation: a case study of pending tasks in email. *Interacting with Computers*, 16, 769-797.
- Hajdukiewicz, J. R., & Vicente, K. J. (2002). Designing for adaptation to novelty and change: The role of functional information and emergent features. *Human Factors*, 44, 592-610.
- Harel, I., & Papert, S. (1990). Software design as a learning environment. *Interactive learning environment*, 1(1).
- Hatchuel, A. (1996). Coopération et conception collective. Variété et crises des rapports de prescription. In E. Friedberg (Ed.), Coopération et Conception (pp. 101-122). Toulouse: Octares editions.
- Hatchuel, A., Le Masson, P., & Weil, B. (2002). De la gestion des connaissances aux organisations orientées conception. *Revue internationale des sciences sociales*, 171, 29-42.
- Hebert, A.-M., Burkhardt, J.-M., & Détienne, F. (2009). Vers l'évaluation de la qualité de la collaboration en conception assistée par des technologies d'information et de communication. In actes du 5eme Colloque de psychologie ergonomique EPIQUE, Nice.
- Herbsleb, J. D., Klein, H., Olson, G. M., Brunner, H., Olson, J. S., & Harding, J. (1995). Object-oriented analysis and design in software project teams. *Human-Computer Interaction*, 10, 249-292.
- Hoc, J.-M. (1984). Les activités de résolution de problème dans la programmation informatique. *Psychologie Française*, 29, 267-271.
- Hoc, J.-M. (2008). Cognitive ergonomics: a multidisciplinary venture. *Ergonomics*, 51, 71 - 75.
- Hoc, J.-M., Green, T. R. G., Samurçay, R., & Gilmore, D. (Eds.). (1990). *Psychology of Programming*: Academic Press.
- Hoc, J.-M., & Nguyen-Xuan, A. (1990). Language Semantics, Mental Models and Analogy. In D. Gilmore (Ed.), *Psychology of Programming* (pp. 139-156): Academic Press.
- Hofmann, H. F., & Lehner, F. (2001). Requirements Engineering as a Success Factor in Software Projects. *IEEE Software*, 18, 58-66.
- Howie, D. E., & Vicente, K. J. (1998). Making the most of ecological interface design: the role of self-explanation. *International Journal of Human-Computer Studies*, 49, 651-674.
- Hu, O., Trigano, P., & Crozat, S. (2001). Une aide à l'évaluation des logiciels Multimédias de formation *Sciences et Techniques Educatives*, 8, 239-274.

- Jackson, S. L., Krajcik, J., & Soloway, E. (1998). The Design of Guided Learner-Adaptable Scaffolding in Interactive Learning Environments. In proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems CHI 98, Los Angeles, California, United States.
- Jamet, E. (2002). La compréhension des documents techniques : Quels effets du format de présentation ? In actes de la conférence ERGO IA 2002, 8-10 Octobre 2002.
- Jamet, E. (2006). Une présentation des principales méthodes d'évaluation des EIAH en psychologie cognitive. *STICEF Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Éducation et la Formation*, 13.
- Jamieson, G. A., & Vicente, K. J. (2001). Ecological interface design for petrochemical applications: supporting operator adaptation, continuous learning, and distributed, collaborative work. *Computers and Chemical Engineering*, 25, 1055 – 1074.
- Jeantet. (1996). La coordination par les objets dans les équipes intégrées de conception de produit. In E. Friedberg (Ed.), Coopération et conception (pp. 87-100). Toulouse: Octares editions.
- Joab, M., & Burkhardt, J.-M. (2006). Simulation, réalité virtuelle et augmentée pour l'apprentissage : un panorama. 4ième Ecole thématique CNRS EIAH « Simulation, réalité virtuelle et augmentée pour l'apprentissage »
- John, B. E., & Kieras, D. E. (1996a). The GOMS family of user interface analysis techniques: comparison and contrast. *ACM transactions on computer-human interaction*, 3, 320-351.
- John, B. E., & Kieras, D. E. (1996b). Using GOMS for user interface design and evaluation: which technique? *ACM transactions on computer-human interaction*, 3, 287-319.
- Johnson, L., Rickel, J., Stiles, R., & Muro, A. (1999). Integrating Pedagogical Agents into Virtual Environments. *Presence*, 7, 523-546.
- Johnson, S. L. (1981). Effect of Training Device on Retention and Transfer of a Procedural Task. *Human Factors*, 23, 257-272.
- Jonassen, D. H. (Ed.). (2004). Handbook of research on educational communications and technology (2nd ed.). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Juchmes, R., & Leclercq, P. (2004). A Multi-Agent System for Architectural Sketches Interpretation. In proceedings of the Eurographics Workshop on Sketch-Based Interfaces, Grenoble, France.
- Kadri, A., Lécuyer, A., Burkhardt, J.-M., & Richir, S. (2007a). The Influence of Visual Appearance of User's Avatar on the Manipulation of Objects in Virtual Environments. Paper presented at the IEEE Virtual Reality 2007, March 10-14 Charlotte, North Carolina USA.
- Kadri, A., Lécuyer, A., Burkhardt, J.-M., & Richir, S. (2007b). Visual Appearance of User's Avatar Can Influence the 3D Manipulation of Both Real Devices and Virtual Objects. In 3D User Interfaces Symposium jointly to IEEE Virtual Reality 2007, March 10-14 Charlotte, North Carolina USA.
- Kant, E., & Newell, A. (1984). Problem solving techniques for the design of algorithms. *Information Processing and Management*, 20, 97-118.
- Kaufmann, H., & Schmalstieg, D. (2003). Mathematics and geometry education with collaborative augmented reality. *Computers & Graphics*, 27, 339-345.
- Kelleher, C., & Pausch, R. (2005). Lowering the Barriers to Programming: a survey of programming environments and languages for novice programmers. *ACM Surveys*, 37, 83 - 137
- Kensing, F., & Blomberg, J. (1998). Participatory Design: Issues and Concerns. *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, 7, 167–185.
- Kerdal, S. (2001). Apprentissage et utilisation d'Internet par des étudiants novices avec les outils internet. Mémoire de maîtrise de Psychologie, Université Paris Descartes Paris.
- Khalife, J. T. (2006). Threshold for the Introduction of Programming: Providing Learners with a Simple Computer Model. In 18th Workshop of the Psychology of Programming Interest Group PPIG 18, University of Sussex, September 2006
- Kieras, D., & Polson, P. G. (1985). An Approach to the Formal Analysis of User Complexity. *International Journal of Man-Machine Studies*, 22, 365-394.

- Kieras, D. E. (1997). Task analysis and the design of functionality. In A. Tucker (Ed.), *The Computer Science and Engineering Handbook* (pp. 1401-1423). Boca Raton: CRC Press Inc.
- Kim, J., Lerch, J., & Simon, H. A. (1995). Internal Representation and Rule Development in Object-Oriented Design. *ACM transactions on Computer-Human Interaction*, 2, 357-390.
- Kintsch, W. (1986). Learning from text. *Cognition and Instruction*, 3, 87-108.
- Kintsch, W. (1994). Text comprehension, Memory and learning. *American Psychologist*, 49, 294-303.
- Kirkley, S., Kirkley, J., Borland, C., Waite, T., Dumanoir, P., Garrity, P., et al. (2002). Embedded training with mobile augmented reality. In proceedings of the 23rd Army Science Conference.
- Kjeldskov, J., & Graham, C. (2003). A Review of Mobile HCI Research Methods. In LNCS: Human-Computer Interaction with Mobile Devices. 5th International Symposium, Mobile HCI 2003 (pp. 317-335). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Klinger, E., Marié, R. M., & Viaud-Delmon, I. (2006). Applications de la Réalité Virtuelle aux troubles cognitifs et comportementaux. In *Le Traité de la Réalité Virtuelle* (Vol. 4, pp. 121-158). Paris: Presses de l'Ecole des Mines de Paris.
- Kluwe, R. (1996). acquisition of knowledge in the control of a simulated technical system. *Le Travail Humain*, 59, 61-85.
- Koenemann, J., & Robertson, S. P. (1991). Expert problem solving strategies for program comprehension. In S. P. Robertson, G. M. Olson & J. S. Olson (Eds.), *CHI'91 Conference Proceedings* (pp. 125-130). NY: ACM press.
- Kolodner, J. L., Camp, P. J., Crismond, D., Fasse, B., Gray, J., Holbrook, J., et al. (2003). Problem-Based Learning Meets Case-Based Reasoning in the Middle-School Science Classroom: Putting Learning by Design Into Practice. *The journal of the learning sciences*, 12, 495-547.
- Kutar, M., Britton, C., & Barker, T. (2002). A Comparison of Empirical Study and Cognitive Dimensions Analysis in the Evaluation of UML Diagrams. In Proceedings of the 14th Workshop of the Psychology of Programming Interest Group.
- Lacomblez, M. (2001). Analyse du travail et élaboration des programmes de formation professionnelle. *Relations Industrielles*, 56(3).
- Lacomblez, M., Santos, M., & Vasconcelos, R. (2004). L'action entre le schème et son résultat. In actes du Séminaire International Transmettre : activité et transmission, Marseilles, APST/APRIT Université de Provence 24-26 juin.
- Laffererie, A., Langa, P., & Négroni, P. (1999). Du système intégré d'informations (progiciel SAP) à de nouvelles formes de gestion : quelles transformations dans la réalisation du travail. In actes du XXXIVème congrès de la SELF, Caen, 15-17 septembre 1999.
- Lauesen, S., & Vinter, O. (2001). Preventing requirements defects: An experiment in process improvement. *Requirements Engineering*, 6, 37-50.
- Laurillard, D. (2002). *Rethinking University Teaching: A Conversational Framework for the Effective Use of Learning Technologies* (2nd ed.). London: RoutledgeFalmer.
- Le Roux, B., & Rouanet, H. (1984). L'analyse multidimensionnelle des données structurées. *Mathématiques et Sciences Humaines*, 85, 5-18.
- Lebahar, J. C. (1996). L'activité de simulation d'un dessinateur CAO dans une tâche de conception. *Le Travail Humain*, 59, 273-275.
- Lécuyer, A., Burkhardt, J.-M., & Etienne, L. (2004). Feeling Bumps and Holes without a Haptic Interface: the Perception of Pseudo-Haptic Textures. In *ACM International Conference on Human Factors in Computing - CHI 2004*, April 24-29, Vienna, Austria.
- Lecuyer, A., Burkhardt, J.-M., Henaff, J.-M., & Donikian, S. (2006). The Use of Camera Motions Can Improve Sensation of Walking in Virtual Environments. In *IEEE Virtual Reality Conference Alexandria, Virginia USA*, 25-29 march 2006.
- Lecuyer, A., Burkhardt, J.-M., Le Biller, J., & Congedo, M. (2005). A 4 : A Technique to Improve Perception of Contacts with Under-Actuated Haptic Devices in virtual Reality. In *proproceedings of the World Haptic Conference 05*, Pisa Italy.

- Lecuyer, A., Burkhardt, J. M., Coquillart, S., & Coiffet, P. (2001). Boundary of Illusion : an Experiment of Sensory Integration with a Pseudo-Haptic System. In proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference, Yokohama, Japan 13-17 march 2001.
- Lecuyer, A., Burkhardt, J. M., & Tan, C.-H. (2008). A Study of the Modification of the Speed and Size of the Cursor for Simulating Pseudo-Haptic Textures. *ACM Transactions on Applied Perception*, 5(3).
- Leonard, D., & Rayport, J. F. (1997). Spark Innovation Through Empathic Design. *Harv. Bus. Rev.*, 6, 102–113.
- Leplat, J. (1955). Analyse du travail et formation. *Bulletin du CERP*, 4, 175-184.
- Leplat, J. (1991). Compétences et ergonomie. In J. Theureau (Ed.), *Modèles en analyse du travail* (pp. 263-278). Liège: Pierre Mardaga.
- Leplat, J. (2002). Psychologie de la formation : Jalons et perspectives (choix de textes 1955-2002). Toulouse: Octarès.
- Leplat, J. (2006). La notion de régulation dans l'analyse de l'activité. *Pistes*, 8(1).
- Leplat, J., Enard, C., & Weill-Fassina, A. (1970). La formation par l'apprentissage. Éléments de psychopédagogie. Paris : PUF.
- Leva, C., Cromie, S., Couix, S., Fabre, D., Burkhardt, J.-M., Plot, E., et al. (2006). Methodology for VR tool design and case study development (Deliverable No. 5.0): Project 515831-2 VIRTUALIS Virtual Reality and Human Factors Applications for Improving Safety.
- Linard, M. (1996). Des machines et des hommes. Apprendre avec les nouvelles technologies. Paris: L'Harmattan.
- Littman, D. C., Pento, J., Letovsky, S., & Soloway, E. (1986). Mental Models and Software Maintenance. Paper presented at the Empirical Studies of Programmers : 1st Workshop, Norwood, NJ.
- Loftin, R. B., & Kenney, P. J. (1995). Training the Hubble Space Telescope Flight Team. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 15, 31-37.
- Lohr, L. L. (2000). Designing the instructional interface. *Computers in Human Behavior*, 16, 161-182.
- Loup-Escande, E., Burkhardt, J. M., Christofol, H., & Richir, S. (in press). 3D Child Software: a decision-making help tool in innovative product design. *Journal of Decision Systems*.
- Lourdeaux, D. (2001). Réalité Virtuelle et formation : Conception d'Environnements Virtuels Pédagogiques. Thèse de doctorat en Informatique, Ecole des Mines de Paris.
- Lourdeaux, D. (2005). APLG Project: a library for learning virtual environments. In proceedings of the Virtual Reality International Conference VRIC 2005, Laval, France.
- Lourdeaux, D., Burkhardt, J.-M., Bernard, F., & Fuchs, P. (2002). Relevance of an intelligent tutorial agent for virtual reality training systems. *International Journal of Continuing Engineering Education and Life-long Learning*, 12, 214-229.
- Lourdeaux, D., Mellet-D'Huart, D., & Burkhardt, J. M. (2003). Potentialities of virtual reality for pedagogical assistance. Proceedings of conference the Virtual Concept France, Biarritz, November 5–7.
- Luengo, V., Vadcard, L., Dubois, M., & Mufti-Alchawafa, D. (2006). TELEOS : de l'analyse de l'activité professionnelle à la formalisation des connaissances pour un environnement d'apprentissage. Actes de IC 2006, 17ème journées francophones d'Ingénierie des connaissances, 28-30 juin 2006, Nantes, France.
- Mackay, W. E. (2000). Is paper safer? The role of paper flight strips in air traffic control. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 6, 311-340.
- Maggi, B. (1987). La régulation du processus d'action de travail. In P. Cazamian (Ed.), *Traité d'ergonomie*. Toulouse: Octarès.
- Maggi, B., & Lagrange, V. (Eds.). (2002). Le travail collectif dans l'industrie à risque - six points de vue de chercheurs étayés et discutés. Toulouse: Octarès.
- Magnusson, L., Hanson, E., & Borg, M. (2004). A literature review study of Information and Communication Technology as a support for frail older people living at home and their family carers. *Technology and Disability*, 16, 223 – 235.

- Maguire, M. (2001). Methods to support human-centred design. *International Journal of Human-Computer Studies*, 55, 587-634.
- Mahendran, D. (2002). Serpents and Primitives: An ethnographic excursion into an Open Source community. Master's Thesis, University of California at Berkeley, Berkeley.
- Maherzi, L. (1997). Rapport mondial sur la communication : les médias face aux défis des nouvelles technologies: Editions UNESCO.
- Maiden, N. A. M., & Rugg, G. (1996). ACRE: selecting methods for requirements acquisition. *Software Engineering Journal*, 11, 183-192.
- Mann, S., & Barfield, W. (2003). Introduction to mediated reality. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 15, 205 – 208.
- Mannes, S. (1988). A theoretical interpretation of learning vs memorizing texts. *European Journal of Psychology and Education*, 3, 157-162.
- Mantovani, G. (1996). Social context in HCI: a New Framework for Mental Models, Cooperation, and Communication. *Cognitive Science*, 20, 237-270.
- Mayer, R., & Moreno, R. (2002). Animation as an Aid to Multimedia Learning. *Educational Psychology Review*, 14, 87-99.
- Mayer, R. E. (2001). Multimedia Learning. Cambridge: Cambridge University Press.
- Mead, S., & Fisk, A. D. (1998). Measuring skill acquisition and retention with an ATM simulator : the need for age specific training. *Human Factors*, 40, 516-523.
- Megard, C., Roselier, S., & Burkhardt, J.-M. (2008). Verbal association to Tactile Patterns : a step towards textured legends in multimodal maps. In proceedings of the ACM international conference on human computer interaction CHI 2008, 5-10 april, Florence, It.
- Mégard, C., Verhaeghe, M., Burkhardt, J.-M., & Roselier, S. (2007). Patterns tactiles pour la lecture de cartes multimodales: associations sémantiques. In actes de la conférence ASSISTH 07, Toulouse, France.
- Mehlenbacher, B., Bennett, L., Bird, T., Ivey, M., Lucas, J., Morton, J., et al. (2005). Usable E-Learning: A Conceptual Model for Evaluation and Design. In Proceedings of HCI International 2005: 11th International Conference on Human-Computer Interaction - Theories, Models, and Processes in HCI.
- Mellet-d'Huart, D. (2006). A model of (en)action to approach embodiment: a cornerstone for the design of virtual environments for learning. *Virtual Reality*, 10, 253–269
- Melyani, M. (1996). Informatique, compagnonnage et bricolage chez les adultes. *Education permanente*, 127, 73-93.
- Mérritte, C. (2002). Formation traditionnelle - autoformation : comparaison empirique de l'activité d'animation du formateur en micro-informatique. Master's thesis, Université Paris Descartes, Paris.
- Michel, G., & Sperandio, J.-C. (1996). L'analogie dans l'apprentissage de la programmation. *Sciences et Techniques éducatives*, 3, 335-352.
- Midler, C. (1998). Evolution des modèles d'organisation et régulations économiques de la conception. *Problèmes économiques*, 2, 558.
- Miller, C. A., & Vicente, K. J. (2001). Comparison of display requirements generated via Hierarchical Task and Abstraction–Decomposition Space analysis techniques. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 5, 335-355.
- Millet, G., Haliyo, D. S., Régnier, S., Lécuyer, A., & Burkhardt, J.-M. (2007). A study on the perception of nanoscales through Virtual Reality. Communication aux 2nd journées de l'AFRV, Marseilles.
- Millet, G., Lécuyer, A., Burkhardt, J.-M., Haliyo, D. S., & Régnier, S. (2008). Improving Perception and Understanding of Nanoscale Phenomena Using Haptics and Visual Analogy. In proceedings of Eurohaptics 2008, 10-13 june, Madrid Spain.
- Millet, G., Lécuyer, A., Burkhardt, J.-M., Haliyo, D. S., & Régnier, S. (submitted). Does Haptics and Visual Analogy help students in understanding Atomic Force Microscopy. ACM transactions on Haptics.

- Milne, I., & Rowe, G. (2002). Difficulties in Learning and Teaching Programming —Views of Students and Tutors. *Education and Information Technologies*, 7, 55–66.
- Minet, F., & Parlier, M. (1996). Comprendre le travail pour gérer les compétences. *Actualité de la formation permanente*, 140, 7-14.
- Mockus, A., Fielding, R. T., & Herbsleb, J. (2002). Two Case Studies of Open Source Software Development: Apache and Mozilla. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*, 11, 309-346.
- Mollo, V., & falzon, P. (2004). Auto- and allo-confrontation as tools for reflective activities. *Applied Ergonomics*, 35, 531-540.
- Moulin, M. (Ed.). (1978). L'ergonomie au service de l'homme au travail? Paris: Entreprise Moderne d'Edition.
- Najjar, L. J. (1998). Principles of educational multimedia user interface design. *Human Factors*, 40, 311-323.
- Narayanan, N. H., & Hegarty, M. (2002). Multimedia design for communication of dynamic information. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 57, 279-315.
- Navarro-prietto, R., & Canas, J. J. (1998). Mental representation and imagery in program comprehension. In proceedings of the european conference on cognitive ergonomics ECCE 9, Limerick, Ireland.
- Nelson, J. (2006). Analyse de l'activité de docking moléculaire et proposition d'éléments de spécification pour les interfaces CORSAIRE (Technical Report). Paris: Université Paris Descartes.
- Nelson, J. (2007). L'exploration de simulations numériques d'écoulements : Etude de l'activité des numériciens en mécanique des fluides (Mémoire de Master Recherche en Ergonomie). Paris: Université Paris Descartes
- Nicolas, L. (2000). L'activité de simulation en Analyse Fonctionnelle : vers des outils anthropocentrés pour la conception de produits automobiles. Thèse de Doctorat en Ergonomie, CNAM Paris.
- Nielsen, J. (1993). Usability Engineering. London: Academic Press.
- Nielsen, J., & Mack, R. L. (Eds.). (1994). Usability inspection methods. New York, NY: John Wiley & sons.
- Norman, D. A., & Draper, S. W. (Eds.). (1986). User-centred system design. Hillsdale NJ: Lawrence Erlbaum associates.
- Nyssen, A. S., & De Keyser, V. (1998). Improving Training in Problem Solving Skills : Analysis of Anesthetists' Performance in Simulated Problem Situations. *Le Travail Humain* 61, 387-401.
- Ochanine, D. (1966). The operative image of controlled objects in man-automatic machine systems. In J. Leplat (Ed.) *L'analyse du travail en psychologie ergonomique* (vol. 1, pp. 99-106). Toulouse : Octarès.
- Olson, G. M., & Olson, J. S. (2000). Distance Matters. *Human-Computer Interaction*, 15, 139-178.
- Olson, G. M., Olson, J. S., Carter, M. R., & Storrosten, M. (1992). Small Group Design Meetings: An Analysis of Collaboration. *Human-Computer Interaction*, 7, 347-374.
- Ombredane, A. (1955). Introduction. In J.-M. Faverge (Ed.), *L'analyse du travail* (pp. 1-18). Paris: PUF.
- Paljic, A., Burkhardt, J.-M., & Coquillart, S. (2004). Evaluation of pseudo-haptic feedback for simulating torque : a comparison between isometric and elastic input devices. In proceedings of the 12th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, March 27-28, Chicago, USA.
- Paljic, A., Coquillart, S., Burkhardt, J.-M., & Richard, P. (2002). A study of distance of manipulation on the responsive workbench. In proceedings of the Immersive Projection Symposia IPT-VR 2002, 24-28 march 2002, Orlando.
- Pane, J. F., & Myers, B. A. (1996). Usability issues in the design of Novice Programming Systems (Human-Computer Interaction Institute Tech. report No. CMU-HCII-96-101). Pittsburgh, Pennsylvania: Carnegie Mellon University.
- Pane, J. F., Ratanamaha, C., & Myers, B. A. (2001). Studying the language and structure in non-programmers' solutions to programming problems. *International Journal of Human-Computer Studies*, 54, 237-264
- Park, J., Blythe, M., Monk, A., & Grayson, D. (2006). Sharable digital TV: Relating ethnography to design through un-useless product suggestions. Proceedings of ACM CHI 2006, Montreal, Quebec, Canada.

- Pastré, P. (1994). Le rôle des schèmes et des concepts dans la formation des compétences. *Performances humaines et techniques*, 71, 21-28.
- Pastré, P. (1997). Didactique professionnelle et développement. *Psychologie Française*, 42(1), 89-100.
- Pastré, P. (2005). Apprendre par la simulation. De l'analyse du travail aux apprentissages professionnels. Toulouse: Octarès Editions.
- Patel, H., Sharples, S., Letourneur, S., Johansson, E., Hoffmann, H., Lorisson, J., et al. (2006). Practical Evaluations of Real User Company Needs for Visualization Technologies. *International Journal of Human-Computer Studies*, 64, 267-279.
- Patrick, J. (1992). Training : research and Practice. London: Academic Press.
- Patrick, J. (1993). Cognitive aspects of fault-finding training and transfer. *Le Travail Humain*, 56, 187-209.
- Peccoud, F. (2000). Les nouvelles pratiques de la formation. *Les cahiers du numérique*, 2, 89-102.
- Pellegrin, L., Bonnardeau, N., Antonini, F., Albanese, J., Martin, C., & Chaudet, H. (2007). Event Oriented Representation for Collaborative Activities (EORCA): A method for describing medical activities in severe-injured patient managements. *Methods of Inf Med*, 46(5), 506-515.
- Pelletier, M. (2001). Utilisation des outils de bureautiques par les secrétaires: le cas de power-point. Unpublished mémoire de maîtrise, Université Paris Descartes, Paris.
- Pennington, N. (1987). Stimulus Structures and Mental Representations in Expert Comprehension of Computer Programs. *Cognitive Psychology*, 19, 295-341.
- Pennington, N., Lee, A. Y., & Rehder, B. (1995). Cognitives Activities and Levels of Abstraction in Procedural and Object-Oriented Design. *Human-Computer Interaction*, 10, 171-226
- Perruchet, P., & Nicolas, S. (1998). Apprentissage implicite : un débat théorique. *Psychologie Française*, 43, 13-25.
- Petre, M., Blackwell, A. F., & Green, T. R. G. (1998). Cognitive Questions in Software Visualisation. In B. Price (Ed.), *Software visualization : Programming as a multi-media experience* (pp. 453-480): MIT Press.
- Poitrenaud, S. (1995). The PROCOPE semantic network: an alternative to action grammars. *International Journal of Human-Computer studies*, 42, 31-69.
- Pollier, A. (1992). Evaluation d'une interface par des ergonomes : diagnostics et stratégies. *Le Travail Humain*, 55, 71-95.
- Polson, P. G., & Lewis, C. H. (1990). Theory-based design for easily learned interfaces. *Human Computer Interaction*, 5, 191-220.
- Querelle, L., & Thibault, J.-F. (2007). La pratique de l'intervention d'ergonomes consultants : une approche réflexive orientée par les outils. *@ctivités*, 4(1), 149-159.
- Querrec, R. (2002). Les systèmes multi-agents pour les Environnements Virtuels de Formation. Application à la sécurité civile. Thèse de doctorat de 3eme cycle, Université de Bretagne Occidentale, Brest.
- Quinn, C. N., & Wild, M. (1998). Supporting cognitive design: lessons from human-computer interaction and computer-mediated learning. *Education & Information technologies*, 3, 175-185.
- Rabardel, P. (1989). Analyse de l'activité cognitive et modélisation des situations pour l'évaluation et la conception de robots pédagogiques. In Actes du 1er congrès francophone de robotique pédagogique.
- Rabardel, P. (1995). *Les Hommes & les Technologies : approche cognitive des instruments contemporains*. Paris: Armand Colin.
- Rabardel, P., & Beguin, P. (2005). Instrument mediated activity: from subject development to anthropocentric design. *Theoretical Issues in Ergonomic Science*, 6, 429 - 461
- Rabardel, P., Rogalsky, J., & Beguin, P. (1996). Les processus de coopération à l'articulation entre modalités organisationnelles et activités individuelles. In E. Friedberg (Ed.), *Coopération et conception* (pp. 299-306). Toulouse: Octares editions.
- Rasmussen, J. (1983). Skills, rules and knowledge : signals, signs and symbols and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 13, 257-266.

- Rauterberg, M., & Aeppli, R. (1996). How to Measure the Behavioural and Cognitive Complexity of Learning Processes in Man-Machine Systems. In proceedings of Educational Multimedia and Hypermedia-ED-MEDIA'96.
- Raymond, E. S. (1999). The cathedral and the bazaar. Retrieved 20 june, 2005, from <http://www.tuxedo.org/esr/writings/cathedral-bazaar/>
- Régnier, J., & de Montmollin, M. (1968). Reconnaissance de l'organisation, recherche de l'ordonnancement des éléments et choix du mode d'enseignement de la matière. *Le travail humain*, 31, 239-252.
- Resnick, M., & Ocko, S. (september 1990). LEGO/Logo: Learning Through and About Design: MIT -Media Lab.
- Rheingold, H. (1993). The Virtual Community: Homesteading on the Electronic Frontier. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley.
- Richard, J.-F. (1983). Logique du fonctionnement et logique d'utilisation (Rapport de recherche No. 202): INRIA.
- Richard, J.-F. (1990). Connaissances et représentations. In R. Ghiglione (Ed.), *Traité de Psychologie Cognitive* (Vol. 2, pp. 37-102). Paris: Dunod.
- Rickel, J., Gratch, J., Hill, R., Marsella, S., & Swartout, W. (2001). Steve goes to Bosnia: towards a new generation of virtual humans for interactive experiences. In proceedings of the AAAI Spring symposium on artifical Intelligence and Interactive Entertainment.
- Rickel, J., & Johnson, W. L. (1999). Animated Agents for Procedural Training in Virtual Reality: Perception, Cognition, and Motor Control. *Applied Artificial Intelligence*, 13, 343-382.
- Riecken, R. D., Koenemann-Belliveau, J., & Robertson, S. P. (1991). What do expert programmers communicate by means of descriptive commenting. In proceedings of the Empirical Studies of Programmers: 4th workshop, Norwood, NJ.
- Ripoche, G., & Sansonnet, J.-P. (2006). Experiences in Automating the Analysis of Linguistic Interactions for the Study of Distributed Collectives. *Journal of Computer-Supported Cooperative Work*, 15, 149-183.
- Rist, R. S. (1989). Schema Creation in Programming. *Cognitive Science*, 13, 389-414.
- Rist, R. S. (1991). Knowledge creation and retrieval in program design: a comparison of novice and intermediate students programmers. *Human-Computer Interactions*, 6, 1-46.
- Rist, R. S. (1996). System Structure and Design. In procceedings of Empirical Studies of Programmers 6th Workshop, Washington DC, U.S. January 1996.
- Riva, G. (2009). Virtual reality: an experiential tool for clinical psychology. *British Journal of Guidance & Counselling*, 37, 335-343.
- Robertson, S. P. (2001). Requirements Trawling: Techniques for Discovering requirements. *International Journal of Human-Computer studies*, 55, 405-421.
- Robertson, S. P., & Yu, C.-C. (1990). Common cognitive representations of program code across tasks and languages. *International Journal Man-Machine Studies*, 33, 343-360.
- Robins, A., Rountree, J., & Rountree, N. (2003). Learning and Teaching Programming: A Review and Discussion. *Computer Science Education*, 13, 137 - 172.
- Rogalski, J. (2003). Y a t'il un pilote dans la classe? Une analyse de l'activité de l'enseignant comme gestion d'un environnement dynamique ouvert. *Recherches en didactique des mathématiques*, 23, 343-388.
- Rogalski, J. (2004). La didactique professionnelle : une alternative aux approches de « cognition située » et «cognitiviste» en psychologie des acquisitions. *@ctivités*, 1, 103-120.
- Rogalski, J., & Samurcay, R. (1994). Modélisation d'un savoir de référence et transposition didactique dans la formation de professionnels de haut niveau. In G. Arsac, Y. Chevallard, J. L. Martinand & A. Tiberghien (Eds.), *La transposition didactique à l'épreuve*. Grenoble: La pensée sauvage.
- Rosson, M. B. (1984). Effects of experience on learning, using, and evaluating a text editor. *Human Factors*, 26, 463-475.
- Rosson, M. B., & Carroll, J. M. (2005). Minimalist Design for Informal Learning in Community Computing. In proceedings of the conference Communities & Technology 2005, Dordrecht, The Netherlands.

- Roth, W.-M. (2001). Modeling design as situated and distributed process. *Learning and instruction*, 11, 211-239.
- Rouanet, H., & Le Roux, B. (1993). L'analyse des données multidimensionnelles. Paris: Dunod.
- Rouanet, H., & Lépine, D. (1977). Introduction à l'analyse des comparaisons pour le traitement des données expérimentales. *Informatique et Sciences Humaines*, 33-34, 10-25.
- Rouet, J.-F., Deleuze-Dordron, C., & Bisschet, A. (1995). Documentation as part of design: exploratory field studies. In Proceedings of Interact'95, 27-29 June 1995, Lillehammer Norway.
- Rouet, J.-F., & Tricot, A. (1995). Recherche d'information dans les systèmes hypertextes : des représentations de la tâche à un modèle de l'activité cognitive. *Sciences et Techniques Educatives*, 2, 307-331.
- Rouet, J.-F., & Tricot, A. (1998). Chercher de l'information dans un hypertexte : vers un modèle des processus cognitifs. In A. Tricot & J.-F. Rouet (Eds.), *Les hypermédias, approches cognitives et ergonomiques* (pp. 57-74). Paris: Hermès.
- Roussou, M., Johnson, A., Leigh, J., Vasilakis, C., Barnes, C., & Moher, T. (1997). NICE: Combining Constructionism, Narrative, and Collaboration in a Virtual Learning Environment. *Computer Graphics ACM SIGGRAPH*, 31(3), 62-63.
- Roussou, M., Johnson, A., Moher, T., Leigh, J., Vasilakis, C. A., & Barnes, C. R. (1999). Learning and Building together in an immersive virtual world. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8, 247-263.
- Ryan, N. S., Pascoe, J., & Morse, D. R. (1998). Enhanced reality fieldwork: the context-aware archaeological assistant. In V. Gaffney, M. van Leusen & S. Exxon (Eds.), *Computer applications in archaeology 1998*. Oxford, UK: Tempus Reparatum.
- Sack, W., Détienne, F., Ducheneaut, N., Burkhardt, J.-M., Barcellini, F., & Mahendran, D. (2006). A Methodological Framework for Socio-Cognitive Analyses of Collaborative Design of Open Source Software. *International journal of Computer Supported Cooperative Work*, 15, 229-250.
- Safin, S., Boulanger, C., & Leclercq, P. (2005). Premières évaluations d'un Bureau Virtuel pour un processus de conception augmenté. In actes de la 17ème Conférence Francophone sur l' Interaction Homme-Machine IHM 2005.
- Safin, S., Verschueren, A., Burkhardt, J.-M., & Détienne, F. (2010). Adaptation mutuelle du processus de conception, du rôle de l'enseignant et de la qualité de la collaboration dans une situation de conception collaborative à distance. In actes du 45me Congrès de la Self, Liège, Belgique.
- Salembier, P., Claes, G., Ounis, O., Razoarivelo, Z., & Sridharan, M. S. (1989). Autoformation, EIAO et ergonomie : un exemple de conception. In V. De Keyser & A. van Daele (Eds.), *L'ergonomie de conception*. Bruxelle: De Boeck Université.
- Salzman, M., Dede, C., Loftin, R. B., & Chen, J. (1999). A Model for Understanding How Virtual Reality Aids Complex Conceptual Learning. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 8, 293-316.
- Samurçay, R., & Pastré, P. (1998). L'ergonomie et la diactique : l'émergence d'un nouveau champ de recherche : didactique professionnelle. In Actes des journées "Recherche et ergonomie", Toulouse, février 1998.
- Samurçay, R., & Rogalski, J. (1998). Exploitation didactique des situations de simulation. *Le Travail Humain*, 61, 333-359.
- Sander, E., & Richard, J.-F. (1997). Analogical transfer as guided by an abstraction process: the case of learning by doing text editing. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 23, 1459-1483.
- Santos, M., & Lacomblez, M. (2006). Evaluation de pratiques de formation à partir d'un référentiel théorique. *Education Permanente*, 166, 105-114.
- Satava, R. M., & Jones, S. B. (2002). Medical applications of Virtual Environments. In K. M. Stanney (Ed.), *Handbook of Virtual Environments* (pp. 937-958). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

- Scaife, M., Rogers, Y., Aldrich, F., & Davies, M. (1997). Designing for or designing with? Informant design for interactive learning design environments. In proceedings of the ACM International Conference on Human Factors in Computing - CHI 97, Atlanta, Georgia USA.
- Scapin, D., & Bastien, C. (2001). Analyse des tâches et aide ergonomique à la conception : l'approche MAD*. In C. Kolski (Ed.), Analyse et conception de l'IHM. Interaction homme-machine pour les SI (Vol. 1, pp. 85-116). Paris: Hermès.
- Schmalhofer, F., & Glavanov, D. (1986). Three Components of Understanding a Programmer's Manual: Verbatim, Propositional, and Situational Representations. *Journal of Memory and Language*, 25, 295-313.
- Schneiderman, B. (1980). Software Psychology. Cambridge, Mass: Winthrop Publishers.
- Schön, D. (1983). The reflective practitioner. How professionals think in action. USA: Harper Collins Publisher.
- Schwald, B., & De Laval, B. (2003). An augmented reality system for training and assistance to maintenance in the industrial context. In proceedings of the 11th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision (WSCG'03).
- Shelton, B., & Hedley, N. (2002). Using augmented reality for teaching earth-sun relationships to undergraduate geography students. In proceedings of the 1st IEEE International Augmented Reality Toolkit Workshop: IEEE press.
- Shewchuk, J. P., Chung, K. H., & Williges, R. C. (2002). Virtual environments in Manufacturing. In K. M. Stanney (Ed.), Handbook of Virtual Environments (pp. 1119-1141). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Simon, H. A. (1973). The structure of ill structured problems. *Artificial Intelligence*, 4, 181-201.
- Singley, M. K., & Anderson, J. R. (1987-1988). A keystroke analysis of learning and transfer in text editing. *Human-Computer Interaction*, 3, 223-274.
- Singley, M. K., & Anderson, J. R. (1989). The transfer of cognitive skill. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Sitti, M. (2007). Microscale and nanoscale robotics systems - grand challenges of robotics. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 14, 53–60.
- Soloway, E. (1982). What do novice knows about programming. In B. Schneiderman (Ed.), Directions in Human Computer Interactions (pp. 27-54).
- Soloway, E., & Erhlich, K. (1984). Empirical Studies of Programming Knowledge. *Transactions on Software Engineering*, 10, 5, 595 - 609.
- Soloway, E., Guzdial, M., & Hay, K. (1994). Learner-Centered Design – the challenge for HCI in the 21st Century. *Interactions*, 1, 36-48.
- Spada, H., Meier, A., & Rummel, N. (2005). A new method to assess the quality of collaborative process in CSCL. In T. Koschmann, D. Suthers & T. W. Chan (Eds.), Computer Supported Collaborative Learning 2005: The Next 10 Years! (pp. 622-631). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- 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 No. LEI-2000-01). Paris: Université Paris 5.
- Specht, M., Burkhardt, J.-M., & De La Garza, C. (1999). Des activités des ainés confrontes aux nouvelles technologies. *Retraite et société*, 27, 21-38.
- Specht, M., Burkhardt, J.-M., & Garza, C. d. I. (1999). Facteurs d'usage des technologies nouvelles par les personnes âgées : résultats d'enquête. *Revue hospitalière de France*.
- Specht, M., Burkhardt, J.-M., & sperandio, J.-C. (1998). Recommandations ergonomiques et propositions d'évolutions pour le site " Internet Ecole " de ressources pédagogiques Nathan à destination des enseignants du primaire (Rapport Technique No. RT 98-07-01): LEI -université Paris V.
- Specht, M., Burkhardt, J.-M., & Sperandio, J.-C. (1999a). Approche ergonomique de l'adéquation d'Internet aux personnes âgées : les contraintes d'apprentissage. In actes du XXXIV Congrès de la Société d'Ergonomie de Langue Française, Caen, 14-16 septembre 1999.

- Specht, M., Burkhardt, J.-M., & Sperandio, J.-C. (1999b). Processus d'apprentissage dans l'utilisation d'Internet chez les personnes âgées (Rapport No. NM LEI-SNCF /MIR/CNAV): Laboratoire d'Ergonomie Informatique, université Paris V.
- Specht, M., De La Garza, C., & Burkhardt, J.-M. (1999). Approche ergonomique du processus d'apprentissage de l'utilisation du réseau Internet par les personnes âgées. Paper presented at the in Journées Européennes Qualité et innovations technologiques, Paris la Défense, Mars 1999.
- Sperandio, J.-C. (1980). La psychologie en ergonomie: PUF.
- Sperandio, J.-C. (1984). L'ergonomie du travail mental (2nd ed.): Masson.
- Sperandio, J.-C. (2001). Critères ergonomiques de l'assistance technologiques aux opérateurs. In actes de la conférence JIM'2001 : Interaction Homme – Machine & Assistance, Metz.
- Sperandio, J.-C. (Ed.). (1993). L'ergonomie dans la conception des projets informatiques. Toulouse: Octares éditions.
- Sperandio, J.-C., de la Garza, C., Michel, G., Specht, M., & Uzan, G. (1998a). Impact du vieillissement des personnes, handicapées ou non, sur l'utilisation d'objets techniques. *Cahiers de recherches de la MIRE*, 1, 57-62.
- Sperandio, J.-C., de la Garza, C., Michel, G., Specht, M., & Uzan, G. (1998b). Impact du vieillissement des personnes, handicapées ou non, sur l'utilisation d'objets techniques (Rapport final de recherche du Laboratoire d'Ergonomie Informatique): MIRE/CNAV/NEB.
- Sperandio, J.-C., de la Garza, C., Specht, M., Uzan, G., & Michel, G. (1998). Contraintes sensorielles, mnésiques et temporelles chez les personnes vieillissantes utilisatrices d'objets techniques de la vie courante. Paper presented at the Actes de la SELF Société d'Ergonomie de Langue Française, Temps et Travail, Paris, 16-18 Septembre 1998.
- Sperandio, J.-C., & Oltra, R. (2002). Didacticiels pour la formation professionnelle de déficients mentaux travaillant en CAT. *Handicap*, 96, 71-87.
- Squires, D., & Preece, J. (1996). Usability and learning : evaluating the potential of educational software. *Computer & Education*, 27, 15-22.
- Squires, D., & Preece, J. (1999). Predicting quality in educational software: Evaluating for learning, usability and the synergy between them. *Interacting with Computers*, 11, 467 – 483.
- Staggers, N., & Norcio, A. F. (1993). Mental models: concept for human-computer interaction research. *International journal of Man-Machine studies*, 38, 587-605.
- Stanney, K. (Ed.). (2002). Handbook of Virtual Environments : Design, Implementation and Application: L. Erlbaum Associates Publisher.
- Stary, C. (2002). Shifting knowledge form analysis to design: requirements for contextual user interface development. *Behaviour & Information Technology*, 2, 425 – 440.
- Stoffregen, T. A., Bardy, B. G., & Mantel, B. (2006). Affordances in the design of enactive systems. *Virtual Reality*, 10, 4–10
- Sumner, T., Bonnardel, N., & Kallag-Harstad, B. (1997). The cognitive ergonomics of knowledge-based systems. In S. Penberth (Ed.), Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing CHI 97 (pp. 83-90). Atlanta: ACM Press.
- Swartout, W., Gratch, J., Hill, R. W., Hovy, E., Marsella, S., Rickel, J., et al. (2006). Toward virtual humans *AI Magazine*, 27, 96-108.
- Sweller, J. (1994). Cognitive load theory, learning difficulty and instructional design. *Learning and Instruction*, 4, 295–312.
- Tchounikine, P. (2002a). Pour une ingénierie des Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain. *Revue I3 information – interaction – intelligence*, 2(1).
- Tchounikine, P. (2002b). Quelques éléments sur la conception et l'ingénierie des EIAH. In Actes du GDR I3 (pp. 233-245): Cepadues Editions.
- Teasley, B. E. (1994). The effects of naming style and expertise on program comprehension. *International Journal of Human-Computer Studies*, 40, 757-770.

- 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. In actes du XXXII ème congrès de la SELF, Lyon, 17-19 septembre 1997.
- Teiger, C., & Montreuil, S. (1995). Les principaux fondements et apports de l'analyse ergonomique du travail en formation. *Education Permanente*, 124, 13-28.
- Thouvenin, I., Jessel, J.-P., Bourdot, P., De Bonnefoy, N., & Laborie, F. (2006). Industries manufacturières. In P. Guittot (Ed.), *Le Traité de la Réalité Virtuelle: les applications de la réalité virtuelle* (3 ed., Vol. 4, pp. 32). Paris: Presses de l'Ecole des Mines de Paris.
- Tijus, C., Poitrenaud, S., Bouchon-Meunier, B., & Vulpillières, T. D. (2006). Le cartable électronique : sémantique de l'utilisabilité et aide aux apprentissages. *Psychologie Française*, 51, 87–101.
- Tisseau, J. (2001). Réalité Virtuelle –autonomie in virtuo. Unpublished Thèse d'habilitation à diriger des recherches, Université de Rennes 1.
- Torenvliet, G. L., Jamieson, G. A., & Vicente, K. J. (2000). Making the most of ecological interface design: the role of individual differences. *Applied ergonomics*, 31, 395-408.
- Träskbäck, M., & Haller, M. (2004). Mixed Reality Training Application for an Oil Refinery: User Requirements. Paper presented at the ACM SIGGRAPH international conference on Virtual Reality continuum and its Applications in Industry, Singapore, 16-18 June 2004.
- Tricot, A. (2007). Apprentissages et documents numériques. Paris: Belin.
- Tricot, A., & Bastien, C. (1996). La conception des hypermédias pour l'apprentissage : structurer des connaissances rationnellement ou fonctionnellement ? In G.-L. Baron (Ed.), *Hypermédias et apprentissage* (Vol. 3, pp. 23-33): INRP.
- Tricot, A., & Plégat-Soutjis, F. (2003). Pour une approche ergonomique de la conception d'un dispositif de formation à distance utilisant les TIC STICEF, 10.
- Tricot, A., Plégat-Soutjis, F., Camps, J.-F., Amiel, A., Lutz, G., & Morcillo, A. (2003). Utilité, utilisabilité, acceptabilité : interpréter les relations entre trois dimensions de l'évaluation des EIAH. In actes de la Conférence Environnements informatiques pour l'apprentissage humain EIAH 03, Paris.
- Twidale, M. B., & Nichols, D. M. (2005). Exploring usability discussions in Open Source development. In Proceedings of HICSS '05 conference.
- van Dijk, T. A., & Kintsch, W. (1983). Strategies of discourse comprehension. New York: Academic Press.
- van Welie, M., & van der Veer, G. C. (2003). Groupware Task Analysis. In E. Hollnagel (Ed.), *Handbook of Cognitive Task Design* (pp. 447-476). New Jersey, US: Laurence Erlbaum Associates.
- Verhoeven, L., Schnitz, W., & Paas, F. (2009). Cognitive load in interactive knowledge construction. *Learning and instruction*, 19, 369-375.
- Verillon, P., & Rabardel, P. (1995). Cognition and artifacts: a contribution to the study of thought in relation to instrumented activity. *European journal of psychology of education*, 10, 77-101.
- Vermersch, P. (1976). Une approche de la régulation de l'action chez l'adulte. Registre de fonctionnement, déséquilibre transitoire et microgénèse. Un exemple : l'analyse expérimentale de l'apprentissage du réglage de l'oscilloscope cathodique. Thèse de doctorat de 3ème cycle, Université Paris V, Paris.
- Veyrac, H., & Asloum, N. (2009). Les tâches appropriées des professeurs d'enseignement professionnel. Illustration du hiatus entre travail en entreprise et formation. *Activités*, 6, 69-86.
- Vicente, K. J. (1999). Cognitive Work Analysis. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum associates.
- Vicente, K. J. (2000). Revisiting the Constraint Attunement Hypothesis: Reply to Ericsson, Patel, and Kintsch (2000) and Simon and Gobet (2000). *Psychological Review*, 107, 601-608.
- Vicente, K. J. (2002). Ecological interface design: progress and challenges. *Human Factors*, 44, 62–78.
- Vicente, K. J., & Rasmussen, J. (1990). The ecology of human-machine systems II: mediating "direct perception" in complex work domains. *Ecological Psychology*, 2, 207-250.
- Vicente, K. J., & Wang, J. H. (1998). An ecological theory of expertise effects in memory recall. *Psychological Review*, 105, 33-57.

- Visser, W. (1992). Designer's activities examined at three levels: organization, Strategies and Problem-solving processes. *Knowledge-Based Systems*, 5, 92-104.
- Visser, W. (1994). The organisation of design activities : opportunistic, with hierarchical episodes. *Interacting with Computers*, 6, 239-274.
- Visser, W. (1996). Two functions of analogical reasoning in design : a cognitive-psychology approach. *Design Studies*, 17, 417-434.
- Visser, w. (2006). The cognitive artifacts of designing: Lawrence Erlbaum Associates
- Visser, W., & Trousse, B. (1993). Reuse of designs: desperately seeking an interdisciplinary cognitive approach. In proceedings of the Workshop of the Thirteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence "Reuse of designs : an interdisciplinary cognitive approach", Chambéry August 29, 1993.
- Weidenbach, M., Wick, C., Pieper, S., Quast, K. J., Fox, T., Grunst, G., et al. (2000). Augmented reality simulator for training in two-dimensional echocardiography. *Computers and Biomedical Research*, 33, 11-22.
- Weill-Fassina, A., & Pastré, P. (2004). Les compétences professionnelles et leur développement. In P. Falzon (Ed.), Ergonomie (pp. 213-231). Paris: PUF.
- Weill-Fassina, A., & Rabardel, P. (1986). Le dessin technique, un instrument graphique de pensée et de communication professionnel: points de repères. *Le travail Humain*, 48, 301-305.
- Welmann, B., & Gulia, M. (1999). Net surfers don't ride alone:Virtual communities as communities. In M. A. Smith & P. Kollock (Eds.), Communities in Cyberspace (pp. 167-194). New-York: Routledge.
- Wharton, C., Rieman, J., Lewis, C., & Polson, P. (1994). The cognitive Walkthrough Method: a practitioner's guide. In R. L. Mack (Ed.), Usability inspection methods (pp. 105-140). New York, NY: John Wiley & sons.
- Wickens, C. D. (1992). Virtual reality and education. Paper presented at the Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Piscataway, NJ, USA.
- Wilson, J. R. (1991). Ergonomics and participation. In J. R. Wilson & E. N. Corlett (Eds.), Evaluation of Human Work (pp. 1071-1096). London: Taylor and Francis.
- Wilson, J. R., D'Cruz, M., Cobb, S., & Eastgate, M. (1996). Virtual Reality for Industrial Applications. Nottingham, UK: Nottingham University Press.
- Wing, J. M. (1988). A study of 12 specifications of the library problem. *IEEE Software*, 5, 66-72.
- Winn, W., Hoffman, H., Hollander, A., Osberg, K., Roe, H., & Char, P. (1997). The effect of student construction of virtual environments on the performance of high- and low-ability students. In proceedings of the Annual meeting of the American Educational Research Association, Chicago, March 1997.
- Winn, W., Hoffman, H., Hollander, A., Osberg, K., Rose, H., & Char, P. (1999). Student-built virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8, 283-291.
- Wolff, M., Burkhardt, J.-M., & De la Garza, C. (2005). Analyse exploratoire de "points de vue" : une contribution pour outiller les processus de conception. *Le Travail Humain*, 68, 253-284.
- Ye, N., & Salvendy, G. (1996). An objective approach to exploring skill differences in strategies of computer program comprehension. *Behavior & Information Technology*, 15, 139-147.Yvon, F., & Clot, Y. (2003). Apprentissage et développement dans l'analyse du travail enseignant. *Pratiques psychologiques*, 1, 19-35.
- Zhang, Y. (2005). Age, gender, and Internet attitudes among employees in the business world. *Computers in Human Behavior*, 21, 1-10.
- Zhong, X., Liu, P., Georganas, N., & Boulanger, P. (2003). Designing a vision-based collaborative augmented reality application for industrial training. *IT-Information Technology*, 45, 7-18.

8 Travaux et mémoires d'étudiants cités dans le document de synthèse

Abbasi, S., & Burkhardt, J.-M. (2009). Spatial problem solving: assembling three-dimensional puzzles in real and virtual environments. *Cognitive Processing - International Quarterly of Cognitive Science*, 10, 179-181.

Abbasi, S., Burkhardt, J.-M., & Denis, M. (2009). Assister le montage d'objets en réalité virtuelle : étude préliminaire de la résolution de problèmes tri-dimensionnels en environnement réel. In 5eme Colloque de psychologie ergonomique EPIQUE, Nice, France 28-30 septembre 2009.

Anastassova, M. (2003). L'activité des mécaniciens et les évolutions de la conception de véhicules : une étude ergonomique exploratoire d'une assistance par la réalité augmentée. Mémoire de DEA, University Paris Descartes, Paris.

Anastassova, M. (2006). L'analyse ergonomique des besoins en amont de la conception de technologies émergentes. Le cas de la réalité augmentée pour la formation à la maintenance automobile. Thèse de doctorat en Ergonomie de l'Université Paris 5, 13 décembre 2006, Université Paris 5, Paris.

Anastassova, M., & Burkhardt, J.-M. (2007). User-Needs Analysis for Home Applications and Emerging Technologies: Some Methodological Aspects. In proceedings of the Workshop 'Are New Methods Needed in User-Centered System Design?', INTERACT'07, september 10-14, Rio de Janeiro.

Anastassova, M., & Burkhardt, J.-M. (2009). Automotive technicians' training as a community-of-practice: implications for the design of an augmented reality teaching aid. *Applied Ergonomics*, 40, 713-721.

Anastassova, M., Burkhardt, J.-M., & Mégard, C. (2007). User-Centred Design and Evaluation of Augmented Reality Systems for Industrial Applications: Some Deadlocks and Breakthroughs. Proceedings of Virtual Reality International Conference VRIC, 18-20 April Laval, France.

Anastassova, M., Burkhardt, J.-M., Mégard, C., & Breda, J. (2006). Evaluation ergonomique d'un prototype de réalité augmentée par des tests utilisateurs : apports et difficultés. In actes de ERGOIA 2006 France : Biarritz, November.

Anastassova, M., Burkhardt, J.-M., Mégard, C., & Ehanno, P. (2005). Results from a user-centred critical incidents study for guiding future implementation of augmented reality in automotive maintenance. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35, 81-91.

Anastassova, M., Burkhardt, J.-M., Mégard, C., & Ehanno, P. (2007). L'ergonomie de la réalité augmentée pour l'apprentissage : une revue. *Le Travail Humain*, 70(2), 97-126.

Anastassova, M., Burkhardt, J.-M., Mégard, C., & Leservot, A. (2005). User-centred design of Mixed Reality for vehicle maintenance training: an empirical comparison of two techniques for user needs analysis. In HCI international conference (CDROM), Las Vegas, USA.

Anastassova, M., Mégard, C., & Burkhardt, J.-M. (2007). Prototype Evaluation and User-Needs Analysis in the Early Design of Emerging Technologies. In conference HCI-International, Pekin, China.

Arab, F. (2004). Vers une modélisation de l'activité de supervision d'exercices de combat en simulation. Mémoire de DEA d'Ergonomie, Université Paris Descartes, Paris.

Bach, C., Anastassova, M., & Burkhardt, J.-M. (2008). Réflexions sur les complexités technologique, organisationnelle et humaine de la conception des technologies émergentes : l'exemple de la réalité virtuelle, mixte et augmentée. In actes 43ème congrès de la Société d'Ergonomie de Langue Française -Ajaccio.

Barcellini, F. (2008). Conception de l'artefact, conception du collectif : dynamique d'un processus de conception ouvert et continu dans une communauté de développement de logiciels libres. Thèse de doctorat en Ergonomie, CNAM, Paris.

Barcellini, F., Détienne, F., & Burkhardt, J.-M. (2005). Activité de conception de logiciels libres : dynamique et temporalité dans les discussions en ligne. Actes des 3èmes journées d'études en psychologie ergonomique - Epique'05, 26-28 september, 2005, Toulouse, France.

Barcellini, F., Détienne, F., & Burkhardt, J.-M. (2006a). User's participation in the design process of Open source Software Communities: the case of Python. Proceedinfs of Europython 2006, CERN, Geneva 3-5 july 2006.

Barcellini, F., Détienne, F., & Burkhardt, J.-M. (2006b). Users' participation to the design process in a Free Open Source Software online community. Proceedings of the 18th annual PPIG conference, Brighton, UK september 7-8th.

Barcellini, F., Détienne, F., & Burkhardt, J.-M. (2007a). Conception de logiciels libres : enjeux pour l'ergonomie et rôle des utilisateurs dans le processus de conception. Actes de la Conference de la Société d'Ergonomier de Langue Française, Saint-Malo.

Barcellini, F., Détienne, F., & Burkhardt, J.-M. (2007b). Cross-Participation to foster design-use mediation in Open Source Sofware design process. Proceedings of the ECCE2007 European Conference on Cognitive Ergonomics, London.

Barcellini, F., Détienne, F., & Burkhardt, J.-M. (2007c). OSS design communities: an emergent form of distributed participatory design. In proceedings of the workshop on Converging on a "Science of Design" through the Synthesis of Design Methodologies, ACM CHI 2007, April 29, 2007, San Jose, California, USA.

Barcellini, F., Détienne, F., & Burkhardt, J.-M. (2008). Requirements for design participation in open source software communities. Workshop on Distributed Participatory Design associated to the ACM international conference on human computer interaction CHI 2008 5-10 april Florence, It

Barcellini, F., Détienne, F., & Burkhardt, J.-M. (2009a). Measuring participation in online interaction spaces: boundary spanning in an Open Source Software community. International Journal of Industrial Ergonomics, 39, 533–540.

Barcellini, F., Détienne, F., & Burkhardt, J.-M. (2009b). Participation in an Open Source Software Community. Proceedings of the 17th World Congress on Ergonomics IEA 09, Pekin, august 2009.

Barcellini, F., Détienne, F., & Burkhardt, J.-M (2009c). Participation, conscience sociale et conscience du projet dans une communauté de conception et d'usage de logiciels libres Actes du 44 eme congrès de la SELF, Toulouse.

Barcellini, F., Détienne, F., Burkhardt, J.-M., & Sack, W. (2005a). A study of on-line discussions in Open-Source Software Community: Reconstructing thematic coherence from citation practices. Workshop « Free/open-source », Conference « Communities and Technologies'05 », Milano, It, 13-16 June.

Barcellini, F., Détienne, F., Burkhardt, J.-M., & Sack, W. (2005b). Thematic coherence and quotation practices in OSS design-oriented online discussions. Proceedings of the ACM Group 2005 Conference (GROUP'05), Sanibel Island, Florida, USA, November 6-9.

Barcellini, F., Détienne, F., Burkhardt, J.-M., & Sack, W. (2006). Visualizing Roles and Design Interactions in an Open Source Software Community. In proceedings Workshop on "Supporting the Social Side of Large-Scale Software Development", CSCW'06 conference, November 4-8, Banff, Alberta, Canada.

Barcellini, F., Détienne, F., Burkhardt, J.-M., & Sack, W. (2008). A socio-cognitive analysis of online design discussions in an Open Source Software community. *Interacting With Computers*, 20(141-165).

Barcellini, F., Détienne, F., & Burkhardt, J.-M. (2008). Users and developers mediation in an Open Source Software Community: boundary spanning through cross participation in online discussions. *International J. Human-Computer studies*, 66, 558-570.

Bibin, L., Lécyuer, A., Burkhardt, J.-M., Delbos, A., & Bonnet, M. (2008). SAILOR: a 3-D medical simulator of loco-regional anaesthesia based on desktop virtual reality and pseudo-haptic feedback. In S. Feiner, D. Thalmann, P. Guitton,

- B. Fröhlich, E. Kruijff & M. Hachet (Eds.), Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST 2008 (pp. 97-100). Bordeaux, France, October 27-29, 2008: ACM Press.
- Bilavarn, J., Couix, S., Rouillé, M. I., & Burkhardt, J.-M. (2008). Livrable 2.1.2 - Spécification du modèle d'activité humaine (Livrable Projet ANR PERF RV2). Paris: IRISA-Université Paris 5 - UTC.
- Burkhardt, J.-M. (1997). Réutilisation de solutions en conception orientée-objet : un modèle cognitif des mécanismes et représentations mentales. Thèse de Doctorat en Psychologie ergonomique, Paris V René Descartes.
- Burkhardt, J.-M. (2002). E-Learning : a cognitive ergonomics approach. Fourth European ENOP Postgraduate Summerschool "Information technology, Work and organisational psychology.
- Burkhardt, J.-M. (2003a). L'utilisation de véhicules sur un site étendu d'entreprise : une contribution ergonomique à l'analyse des besoins pour la mise en service de véhicules automatisés en libre-service (Technical Report). Rocquencourt: INRIA.
- Burkhardt, J.-M. (2003b). Réalité virtuelle et ergonomie : quelques apports réciproques. *Le Travail Humain*, 66(1), 65-91.
- Burkhardt, J.-M. (2004a). La mise au point de dispositifs haptiques et visuo-haptiques : une approche de l'évaluation adaptée de la psychophysique. *Journée de l'AS Haptique du CNRS*.
- Burkhardt, J.-M. (2005). Evaluation Methods in User-Centred Design of Virtual Environments: current practices and some perspectives in Cognitive Ergonomics. In proceedings of the 2nd INTUITION workshop, Compiègne.
- Burkhardt, J.-M. (2006a). Ergonomie de l'interaction dans les environnements virtuels d'apprentissage. 4ième Ecole thématique CNRS EIAH « Simulation, réalité virtuelle et augmentée pour l'apprentissage ».
- Burkhardt, J.-M. (2006b). Ergonomie, Facteurs Humains et Réalité Virtuelle. In P. Fuchs, G. Moreaux, A. Berthoz & J.-L. Vercher (Eds.), *Le traité de la Réalité Virtuelle* (Vol. 1, pp. 117-150). Paris: Les presses de l'école des mines de Paris.
- Burkhardt, J.-M. (2006c). Prise en compte de la dimension apprentissage en Ergonomie des NTIC. Paper presented at the Séminaire Erasmus Université Paris 5 / Université de Porto / CNAM.
- Burkhardt, J.-M. (2007). Immersion, représentation et collaboration : discussion et perspectives empiriques pour l'ergonomie cognitive de la Réalité Virtuelle. *Intellectica*, 45, 59-87.
- Burkhardt, J.-M. (2009). Conception ergonomique centrée-apprentissage dans les environnements virtuels pour la formation. Conférence invitée, conférence EIAH 2009, Le Mans.
- 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., & Détienne, F. (1994). La réutilisation en génie logiciel : une définition d'un cadre théorique en ergonomie cognitive. Actes de la conférence ERGO.IA '94, 26-28 octobre, Biarritz.
- Burkhardt, J.-M., & Détienne, F. (1995a). An empirical study of software reuse by experts in object-oriented design. Proceedings of Interact'95 conference, 27-29 June 1995, Lillehammer Norway.
- Burkhardt, J.-M., & Détienne, F. (1995b). La réutilisation de solutions en conception de programmes informatiques. *Psychologie Française*, 40-1, 85-98.
- Burkhardt, J.-M., Détienne, F., & Hebert, A.-M. (2008). Vers l'évaluation de la qualité de la collaboration en conception assistée par les technologies de l'Information et de la Communication (Final Report contrat FTR&D CRE 46133216). Paris: Université Paris Descartes & INRIA Rocquencourt.
- Burkhardt, J.-M., Détienne, F., Hebert, A.-M., & Perron, L. (2009). Assessing the "quality of collaboration" in technology-mediated design situations with several dimensions. Proceedings of the conference Interact 2009, Uppsala, 26-28 august.
- Burkhardt, J.-M., Détienne, F., Hebert, A.-M., Perron, L., Safin, S., & Leclercq, P. (2009). An approach to assess the quality of collaboration in technology-mediated design situations. In proceedings of European Conference on Cognitive Ergonomics ECCE 2009, 30 September - 2 October 2009 in Otaniemi, Helsinki
- Burkhardt, J.-M., Détienne, F., Moutsinga-Mpaga, L., Perron, L., Leclercq, P., & Safin, S. (2008). Conception architecturale collaborative avec un « bureau augmenté » : une étude exploratoire de l'effet de la distance et de la co-localisation. Actes de la conférence de la Société d'Ergonomie de Langue Française SELF 2008, Ajaccio.
- Burkhardt, J.-M., Détienne, F., Moutsinga-Mpaga, L., Perron, L., Leclercq, P., & Safin, S. (2008). Multimodal collaborative activity among architectural designers using an augmented desktop at distance or in collocation. Proceedings of the 15th European Conference on Cognitive Ergonomics ECCE 08, Funchal, Portugal.
- Burkhardt, J.-M., Détienne, F., & Wiedenbeck, S. (1998). The effect of object-oriented programming expertise in several dimensions of comprehension strategies. In proceedings of IWPC'98 (International Workshop on Program Comprehension), 24-26 juin 1998, Ischia Italy : IEEE press.
- Burkhardt, J.-M., Detienne, F., & Wiedenbeck, S. (1997). Mental Representations Constructed by experts and novices in Object-Oriented Program Comprehension. Proceeding of INTERACT'97, 14th-18th July 1997, Sydney, Australia.

- Burkhardt, J.-M., Détienne, F., & Wiedenbeck, S. (2002). Object-oriented Program Comprehension: Effect of Expertise, Task and Phase. *Empirical Software Engineering Journal*, 7(2), 115-156.
- Burkhardt, J.-M., Domlan, F., Plot, E., & Laulagnet, G. (2007). Analyse des besoins et des caractéristiques des utilisateurs finaux pressentis autour du scenario " chargement de produits blancs" (Technical report No. Livrable du SP 1.1. – Projet ANR V3S (Virtual Reality for Safe Seveso Substractors)). Paris: Université Paris Descartes.
- Burkhardt, J.-M., Girard, C., Ben Ayed, A., & Lourdeaux, D. (2008). Répertoire des modes opératoires et des déterminants de l'activité des intervenants sous-traitants (Technical Rapport No. Livrable SP1.4 Projet V3S). Paris: Université Paris Descartes.
- Burkhardt, J.-M., Girard, C., Ben Ayed, A., Lourdeaux, D., & Niogret, J.-C. (2009). Objectifs pédagogiques et difficultés d'apprentissage dans la planification, le suivi et la gestion d'activités sous-traitées: résultats (Technical Rapport No. Livrable SP1.3 Projet V3S). Paris: Université Paris Descartes.
- Burkhardt, J.-M., Lourdeaux, D., Couix, S., & Rouillé, M. (2009). La modélisation de l'activité humaine finalisée. In P. Fuchs, G. Moreau, S. Donikian & C. Andriot (Eds.), *Le traité de la Réalité Virtuelle : l'humain virtuel*. Paris: Presses de l'école des Mines de Paris.
- Burkhardt, J.-M., Lourdeaux, D., & Fuchs, P. (1999). Conception d'un système de RV pour la formation des ADC aux opérations en milieu ferroviaire. *Actes des Journées Réalité Virtuelle et Cognition*, Paris, 14-15 décembre 1999.
- Burkhardt, J.-M., Lourdeaux, D., & Lequatre, F. (2005). Environnements Virtuels pour l'Apprentissage : de l'image d'Epinal à la réalité des usages et des configurations socio-techniques. Paper presented at the IHM 2005, September 27-30, Toulouse France.
- Burkhardt, J.-M., Lourdeaux, D., & Mellet d'Huart, D. (2006). La réalité virtuelle pour l'apprentissage humain. In P. Guitton (Ed.), *Le Traité de la Réalité Virtuelle* (Vol. 4). Paris: Presses de l'Ecole des Mines de Paris.
- Burkhardt, J.-M., Lourdeaux, D., & Mellet d'Huart, D. (2003). La conception des environnements virtuels d'apprentissage. In P. Fuchs & G. Moreau (Eds.), *Le traité de la réalité virtuelle* (Vol. 2, pp. 207-296). Paris: presses de l'école des Mines.
- Burkhardt, J.-M., Michel, G., Ronca, L., & Sperandio, J.-C. (1998). L'apport de l'ergonomie aux nouvelles technologies éducatives : la formation médicale virtuelle. *Actes de la conférence NTICF'98 (Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication dans la Formation)*, Rouen, 18-20 Novembre 1998.
- Burkhardt, J.-M., Perron, L., & Plénacoste, P. (2006). Ergonomie de l'interface et de l'interaction. In P. Fuchs, G. Moreau, J.-M. Burkhardt & S. Coquillart (Eds.), *Le traité de la réalité virtuelle* (Vol. 2). Paris: Presse de l'école des mines de Paris.
- Burkhardt, J.-M., Specht, M., & Sperandio, J.-C. (1999). Processus d'apprentissage dans l'utilisation d'internet chez les personnes âgées (Rapport No. NM LEI-CDC /MIR/CNAM). Paris: Laboratoire d'Ergonomie Informatique, université Paris V.
- Burkhardt, J.-M., & Sperandio, J.-C. (2004). Ergonomie et conception informatique. In P. Falzon (Ed.), *Ergonomie* (pp. 437-450). Paris: PUF.
- Burkhardt, J.-M., & Wolff, M. (2002). Réalité virtuelle et nouvelles technologies en formation : vers une formalisation des critères de choix et de la démarche centrée sur l'apprentissage (Rapport de fin de contrat SNCF-LEI). Paris: Université Paris 5 Laboratoire d'Ergonomie Informatique.
- Burkhardt, J.-M., & Wolff, M. (2003). Comparing designers' viewpoints in simulation and virtual reality. Proceeding of the International Ergonomics Association conference, Korea, Seoul, august 2003.
- Burkhardt, J. M. (2004b). L'Ergonomie dans la conception des technologies et des situations d'apprentissage. 2nde Ecole d'été CNRS EIAH « Technologie d'apprentissage et cognition ».
- Burkhardt, J. M., Specht, M., Ronca, L., & Michel, G. (1998). Compte-rendu de la première évaluation de la maquette GRUV auprès de médecins (Rapport No. LEI-98.07.01.). Paris: Laboratoire d'Ergonomie Informatique.
- Couix, s. (2007). Analyse des usages et de la construction des modèles de tâches chez les ergonomes (Mémoire de Master Recherche en Ergonomie). Paris: Université Paris Descartes.
- Couix, S., & Burkhardt, J.-M. (2007). Résultats de l'analyse ergonomique de l'activité finalisée (Livrable 2.1.1). Paris: Projet PERF RV2 Université Paris 5.
- Couix, S., Burkhardt, J. M., Donikian, S., & Rouillé, M. (2007). Etat de l'art sur les modèles de tâches pour la génération d'opérateurs virtuels au travail (Livrable projet ANR- PERF RV2). Paris, Rennes: Université Paris Descartes et INRIA.
- de la Garza, C., & Burkhardt, J.-M. (2001). Modalités d'utilisation "et d'apprentissage de l'Internet par les aînés : le cas du site de la SNCF et de la CDC (rapport final contrat MIRE-CNAV/SNCF/CDC). Paris: LEI université Paris 5.
- de la Garza, C., & Burkhardt, j.-m. (2002). L'apprentissage et l'utilisation de l'Internet par les aînés, une question d'expertise et d'utilité plus que d'âge : le cas du site de la SNCF et de la CDC. In C. G. F. Bouchayer, A. Rozenkier (Ed.), *Les techniques de la vie quotidienne : âges et usages*. Paris: MiRe-DREES / CNAV.

- De La Garza, C., Burkhardt, J.-M., & Specht, M. (1999). Utiliser Internet : aspects d'apprentissage et de formation pour les personnes de plus de 50 ans (Rapport d'étape). Paris: Laboratoire d'Ergonomie Informatique de l'Université Paris 5.
- Debeugny, C., & Burkhardt, J.-M. (2003). Interventions d'aide entre le formateur et les élèves seniors dans une formation à l'informatique. In actes de EPIQUE 2003, Boulogne Billancourt, 2-3 octobre, France.
- Détienne, F., Barcellini, F., & Burkhardt, J.-M. (in press). La conception dans les communautés en ligne : questionnements thématiques et méthodologiques sur ces nouvelles pratiques. In G. Vallery & M. Zouinar (Eds.), Ergonomie et nouvelles technologies.
- Détienne, F., & Burkhardt, J.-M. (2001). Des aspects d'ergonomie cognitive dans la réutilisation en génie logiciel. *Technique & Science Informatiques*, 20(4), 461-487.
- Détienne, F., Burkhardt, J.-M., & Barcellini, F. (2006). Open source software communities: current issues. *CSI Communications* (Computer Society of India), 30(5), 12-16.
- Détienne, F., Burkhardt, J.-M., Hebert, A.-M., & Perron, L. (2008). Assessing the quality of collaboration in design: bridging Cognitive Ergonomics and CSCL approaches. In Workshop "CSCW and Human Factors - Where are we now and what are the challenges?" associated to the 2008 ACM conference on Computer Supported Cooperative Work, 8-12 november, San Diego CA U.S.
- Détienne, F., Burkhardt, J.-M., & Visser, W. (2003). Cognitive effort in collective software design: Methodological perspectives in cognitive ergonomics. Proceedings of the 2nd Workshop in the Workshop Series on Empirical Software Engineering "The Future of Empirical Studies in Software Engineering", Monte Carzio Catone, Italy, Sept 29.
- Détienne, F., Rouet, J.-F., Burkhardt, J.-M., & Deleuze-Dordron, C. (1996). Reusing processes and documenting processes: toward an integrated framework. Paper presented at the ECCE8'96, Grenada, Spain.
- Dominjon, L., Lecuyer, A., Burkhardt, J.-M., Andrade-Barroso, G., & Richir, S. (2005). The "Bubble" Technique: Interacting with Large Virtual Environments Using Haptic Devices with Limited Workspace. In proceedings of World Haptic Conference 05 Pisa Italy.
- Dominjon, L., Lecuyer, A., Burkhardt, J.-M., Andrade-Barroso, G., & Richir, S. (2006). Hybrid Rotations: Overcoming Hardware Rotational Limitations of Force-Feedback Devices. Paper presented at the IEEE Virtual Reality Conference Alexandria, Virginia USA, 25-29 march 2006.
- Dominjon, L., Lecuyer, A., Burkhardt, J.-M., Richard, P., & Richir, S. (2005). Influence of Control/Display Ratio on the Perception of Mass of Manipulated Objects in Virtual Environments. In IEEE Virtual Reality Conference Bonn Germany, 12-16 march 2005.
- Dominjon, L., Lécuyer, A., Burkhardt, J.-M., & Richir, S. (2006). A Comparison of Three Techniques to Interact in Large Virtual Environments Using Haptic Devices with Limited Workspace. In proceedings of Advances in Computer Graphics, 24th Computer Graphics International Conference, CGI 2006, Hangzhou, China, June 26-28, 2006.
- Edward, L., Lourdeaux, D., Lenne, D., Barthès, J.-P., Burkhardt, J.-M., & Camus, F. (2006). Multi-Agents Approach for Modelling Safety Interventions on a SEVESO Site through Virtual Reality. In Proceedings of Virtual Concept 2006, Cancún, Mexico, November 27th – December 1st, 2006.
- Fabre, D., Couix, S., Burkhardt, J.-M., Gounelle, C., & Cabon, P. (2006). Virtual Reality to support human factors for safety: where we are and where we (aim to) go. In proceedings of ESREL - Safety and Reliability Annual Conference, 18-22 september, Estoril, Portugal.
- Férey, N., Bouyer, G., Martin, C., Bourdot, P., Nelson, J., & Burkhardt, J.-M. (2008). User needs analysis to design a 3D multimodal protein-docking interface Paper presented at the IEEE Symposium on 3D User Interfaces 2008, March 8-9 2008 Reno, Nevada USA.
- Férey, N., Bouyer, G., Martin, C., Drif, A., Bourdot, P., Ammi, M., et al. (2009). Docking de protéines en Réalité Virtuelle : une approche hybride et multimodale. *Technique et Science Informatique*, 28(8), 983-1015.
- Férey, N., Nelson, J., Martin, C., Picinali, L., Bouyer, G., Tek, A., et al. (in press). Multisensory VR interaction for Protein-Docking: The CoRSAIRe project. *Virtual Reality*.
- Fuchs, P., & Burkhardt, J.-M. (2003). Approche théorique et pragmatique de la réalité virtuelle. In P. Fuchs & G. Moreau (Eds.), *Le traité de la réalité virtuelle* (Vol. 1, pp. 53-104). Paris: Presses de l'Ecole des Mines de Paris.
- Girard, C., Delgoulet, C., & Burkhardt, J.-M. (2009). Analyse des besoins et prise en compte des dimensions humaines et socio-techniques pour la spécification d'un simulateur pour la formation collective à la gestion de crise NRBC (Livrable Projet SAGECE L1.v4). Paris: ECI Université Paris Descartes.
- Gounelle, C., Cabon, P., Burkhardt, J.-M., Couix, S., Fabre, D., Anastassova, M., et al. (2007). Integrating Human Factors approaches with Virtual Reality for Safety : the Virthualis project. In proceedings of the Virtual Reality International Conference VRIC, 18-20 April Laval, France.
- Grosjean, J., Burkhardt, J.-m., Coquillart, S., & Richard, P. (2002). Evaluation of the Command and Control Cube. In IEEE 4th International Conference on Multimodal Interfaces, October 14-16 2002, Pittsburgh PA USA.

Hebert, A.-M., Burkhardt, J.-M., & Détienne, F. (2009). Vers l'évaluation de la qualité de la collaboration en conception assistée par des technologies d'information et de communication. Paper presented at the 5eme Colloque de psychologie ergonomique EPIQUE.

Joab, M., & Burkhardt, J.-M. (2006). Simulation, réalité virtuelle et augmentée pour l'apprentissage : un panorama. 4ième Ecole thématique CNRS EIAH « Simulation, réalité virtuelle et augmentée pour l'apprentissage »

Kadri, A., Lécuyer, A., Burkhardt, J.-M., & Richir, S. (2007a). The Influence of Visual Appearance of User's Avatar on the Manipulation of Objects in Virtual Environments. In proceedings of the IEEE Virtual Reality 2007, March 10-14 Charlotte, North Carolina USA.

Kadri, A., Lécuyer, A., Burkhardt, J.-M., & Richir, S. (2007b). Visual Appearance of User's Avatar Can Influence the 3D Manipulation of Both Real Devices and Virtual Objects. In 3D User Interfaces Symposium jointly to IEEE Virtual Reality 2007, March 10-14 Charlotte, North Carolina USA.

Kerdal, S. (2001). Apprentissage et utilisation d'Internet par des étudiants novices avec les outils internet. Mémoire de maîtrise de Psychologie, Université Paris 5 Paris.

Lécuyer, A., Burkhardt, J.-M., & Etienne, L. (2004). Feeling Bumps and Holes without a Haptic Interface: the Perception of Pseudo-Haptic Textures. In proceedings of the ACM International Conference on Human Factors in Computing - CHI 2004, April 24-29, Vienna, Austria.

Lécuyer, A., Burkhardt, J.-M., Henaff, J.-M., & Donikian, S. (2006). The Use of Camera Motions Can Improve Sensation of Walking in Virtual Environments. In proceedings of IEEE Virtual Reality Conference Alexandria, Virginia USA, 25-29 march 2006.

Lécuyer, A., Burkhardt, J.-M., Le Biller, J., & Congedo, M. (2005). A 4 : A Technique to Improve Perception of Contacts with Under-Actuated Haptic Devices in virtual Reality. In proceedings of World Haptic Conference 05, Pisa Italy.

Lécuyer, A., Burkhardt, J. M., Coquillart, S., & Coiffet, P. (2001). Boundary of Illusion : an Experiment of Sensory Integration with a Pseudo-Haptic System. In proceedings of IEEE Virtual Reality Conference, Yokohama, Japan 13-17 march 2001.

Lécuyer, A., Burkhardt, J. M., & Tan, C.-H. (2008). A Study of the Modification of the Speed and Size of the Cursor for Simulating Pseudo-Haptic Textures. ACM Transactions on Applied Perception, 5(3).

Leva, C., Cromie, S., Couix, S., Fabre, D., Burkhardt, J.-M., Plot, E., et al. (2006). Methodology for VR tool design and case study development (Delivrable No. 5.0): Project 515831-2 VIRTHUALIS Virtual Reality and Human Factors Applications for Improving Safety.

Loup-Escande, E., Burkhardt, J. M., Christofol, H., & Richir, S. (in press). 3D Child Software: a decision-making help tool in innovative product design. Journal of Decision Systems.

Lourdeaux, D., Burkhardt, J.-M., Bernard, F., & Fuchs, P. (2002). Relevance of an intelligent tutorial agent for virtual reality training systems. International Journal of Continuing Engineering Education and Life-long Learning, 12(1-4), 214-229.

Lourdeaux, D., Mellet-D'Huart, D., & Burkhardt, J. M. (2003). Potentialities of virtual reality for pedagogical assistance. In proceedings of Virtual concept France, Biarritz, November 5-7.

Mégard, C., Roselier, S., & Burkhardt, J.-M. (2008). Verbal association to Tactile Patterns : a step towards textured legends in multimodal maps. In proceedings of ACM international conference on human computer interaction CHI 2008, 5-10 april, Florence, It.

Mégard, C., Verhaeghe, M., Burkhardt, J.-M., & Roselier, S. (2007). Patterns tactiles pour la lecture de cartes multimodales: associations sémantiques. In actes de ASSISTH 07, Toulouse, France.

Mérritte, C. (2002). Formation traditionnelle - autoformation : comparaison empirique de l'activité d'animation du formateur en micro-informatique. Mémoire de maîtrise de Psychologie, Université Paris Descartes, Paris.

Millet, G., Haliyo, D. S., Régnier, S., Lécuyer, A., & Burkhardt, J.-M. (2007). A study on the perception of nanoscales through Virtual Reality. In actes des 2nd journées de l'AFRV.

Millet, G., Lécuyer, A., Burkhardt, J.-M., Haliyo, D. S., & Régnier, S. (2008). Improving Perception and Understanding of Nanoscale Phenomena Using Haptics and Visual Analogy. In proceedings of Eurohaptics 2008, 10-13 june, Madrid Spain.

Millet, G., Lécuyer, A., Burkhardt, J.-M., Haliyo, D. S., & Régnier, S. (soumis). Does Haptics and Visual Analogy help students in understanding Atomic Force Microscopy. ACM transactions on Haptics.

Nelson, J. (2006). Analyse de l'activité de docking moléculaire et proposition d'éléments de spécification pour les interfaces CORSAIRE (Internal Technical Report). Paris: Université Paris Descartes.

Nelson, J. (2007). L'exploration de simulations numériques d'écoulements : Etude de l'activité des numériciens en mécanique des fluides (Mémoire de Master Recherche en Ergonomie). Paris: Université Paris Descartes.

- Paljic, A., Burkhardt, J.-M., & Coquillart, S. (2004). Evaluation of pseudo-haptic feedback for simulating torque : a comparison between isometric and elastic input devices. In proceedings of 12th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, March 27-28, Chicago, USA.
- Paljic, A., Coquillart, S., Burkhardt, J.-M., & Richard, P. (2002). A study of distance of manipulation on the responsive workbench. In proceedings of Immersive Projection Symposia IPT-VR 2002, 24-28 march 2002, Orlando.
- Pelletier, M. (2001). Utilisation des outils de bureautiques par les secrétaires: le cas de power-point. Mémoire de maîtrise de Psychologie, Université Paris Descartes, Paris.
- Sack, W., Détienne, F., Ducheneaut, N., Burkhardt, j.-m., Barcellini, F., & Mahendran, D. (2006). A Methodological Framework for Socio-Cognitive Analyses of Collaborative Design of Open Source. *Software. International journal of Computer Supported Cooperative Work*, 15 229-250.
- Safin, S., Verschueren, A., Burkhardt, J.-M., & Détienne, F. (2010). Adaptation mutuelle du processus de conception, du rôle de l'enseignant et de la qualité de la collaboration dans une situation de conception collaborative à distance. In actes du 45me Congrès de la Self, Liège, Belgique.
- 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 No. LEI-2000-01). Paris: Université Paris 5.
- Specht, M., Burkhardt, J.-M., & De La Garza, C. (1999). Des activités des ainés confrontes aux nouvelles technologies. Retraite et société, 27, 21-38.
- Specht, M., Burkhardt, J.-M., & De la Garza, C. (1999). Facteurs d'usage des technologies nouvelles par les personnes âgées : résultats d'enquête. Revue hospitalière de France.
- Specht, M., Burkhardt, J.-M., & sperandio, J.-C. (1998). Recommandations ergonomiques et propositions d'évolutions pour le site " Internet Ecole " de ressources pédagogiques Nathan à destination des enseignants du primaire (Rapport Technique No. RT 98-07-01): LEI -université Paris V.
- Specht, M., Burkhardt, J.-M., & Sperandio, J.-C. (1999a). Approche ergonomique de l'adéquation d'Internet aux personnes âgées : les contraintes d'apprentissage. In actes du XXXIV Congrès de la Société d'Ergonomie de Langue Française, Caen, 14-16 septembre 1999.
- Specht, M., Burkhardt, J.-M., & Sperandio, J.-C. (1999b). Processus d'apprentissage dans l'utilisation d'Internet chez les personnes âgées (Rapport No. NM LEI-SNCF /MIR/CNAV): Laboratoire d'Ergonomie Informatique, université Paris V.
- Specht, M., De La Garza, C., & Burkhardt, J.-M. (1999). Approche ergonomique du processus d'apprentissage de l'utilisation du réseau Internet par les personnes âgées. In Journées Européennes Qualité et innovations technologiques, Paris la Défense, Mars 1999.
- Wolff, M., Burkhardt, J.-M., & De la Garza, C. (2005). Analyse exploratoire de "points de vue" : une contribution pour outiller les processus de conception. Le Travail Humain, 68, 253-284.