

Concevoir avec des technologies émergentes pour la construction conjointe des pratiques et des artefacts : apports d'une méthodologie participative à l'innovation technologique et pédagogique

Cédric Knibbe

▶ **To cite this version:**

Cédric Knibbe. Concevoir avec des technologies émergentes pour la construction conjointe des pratiques et des artefacts : apports d'une méthodologie participative à l'innovation technologique et pédagogique. Education. Conservatoire national des arts et metiers - CNAM, 2016. Français. NNT : 2016CNAM1123 . tel-01635882

HAL Id: tel-01635882
https://theses.hal.science/tel-01635882

Submitted on 15 Nov 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

le cnam

ÉCOLE DOCTORALE ABBÉ-GRÉGOIRE

Centre de Recherche sur le Travail et le Développement

THÈSE présentée par :

Cédric KNIBBE

soutenue le : **20 décembre 2016**

pour obtenir le grade de : **Docteur du Conservatoire National des Arts et Métiers**

Discipline : Psychologie, psychologie clinique, psychologie sociale

Spécialité : Ergonomie

Concevoir avec des technologies émergentes pour la construction conjointe des pratiques et des artefacts :

apports d'une méthodologie participative à l'innovation technologique et pédagogique

THÈSE dirigée par :

Pierre FALZON	Professeur Cnam, Cnam
Yannick LÉMONIE	Maître de Conférences, Cnam

RAPPORTEURS :

Jean-Marie BURKHART	Directeur Recherche, IFSTTAR
Éric BRUILLARD	Professeur, ENS Cachan

JURY :

Christine MÉGARD	Docteure, CEA-LIST, co-encadrante
Françoise DECORTIS	Professeure, Université Paris 8 (présidente du jury)

À Michel.

Remerciements

À Pierre Falzon et Yannick Lémonie pour m'avoir permis de réaliser cette thèse, pour leur investissement et pour la qualité de leur encadrement. Merci d'avoir accepté de diriger ce travail de recherche par vos conseils, vos relectures, vos contributions et vos encouragements.

À Christine Mégard pour avoir encadré ce travail de thèse et pour me l'avoir proposé au départ. Merci pour tes conseils, ton soutien, ta disponibilité, ta confiance, tes relectures et l'autonomie que tu m'as laissée.

Aux membres du jury Éric Bruillard, Jean-Marie Burkhardt et Françoise Decortis pour l'intérêt qu'ils ont accordé à mes travaux.

Aux membres du Laboratoire des Interfaces Sensorielles en Ambiantes du CEA-LIST, à Moustapha pour m'y m'avoir accueilli, Sylvain pour notre collaboration dans le cadre du projet Tactileo, Annick et Odile pour leur soutien logistique indispensable, Valentin et M. Thomas Terence pour leur bonne humeur et pour nos échanges philosophiques, à Gérard et René pour nos échanges culturels, à Fanny, Sabrina, Lucie, Farah, Sonia pour leur aide, Margarita pour m'avoir initialement accueilli en stage au LISA, à Mehdi, Nicolas, Laurent, Charles, Edouard, Carlos, Alexandre, Gwenaël, Christian, Sylvie, Emmanuel, PH, PA, Lucille, Alix, Quentin et enfin Steven pour sa bonne humeur. Merci à tous pour l'ambiance de travail et pour les moments détente.

Aux membres de l'équipe Ergonomie du CRTD, à Denise, Chimène, Willy, Adelaïde, Laurent, Hakim et Aude pour leurs retours enrichissants. Je souhaite remercier en particulier Gaëtan et Flore pour leur disponibilité et leur aide. Merci également aux doctorantes du laboratoire, à Maria-Isabelle, Claire, Camille, Laetitia, Sylvie, Dorothée, Marie, Julia, Laurianne et Fabiola.

À Karine, Fabien et David du groupe de travail de l'IFÉ pour leur participation et leur aide, et sans qui ce travail n'aurait pas pu se faire.

Merci enfin à mes camarades de rédaction pour leur soutien infaillible et essentiel, à Gianna Belin avec sa description du courant autopognetique et à Harald pour ses apports théoriques dans le domaine des vitres avec de l'électricité dedans.

Résumé

Les Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Enseignement (TICE) peuvent transformer profondément les pratiques pédagogiques. Cependant, pour que ce bénéfice potentiel se réalise, il faut que les solutions produites en conception puissent à la fois s'intégrer à ces pratiques et être source d'innovations potentielles, en termes de plus-values pour les activités d'enseignement et d'apprentissage.

L'objectif de cette thèse est de mettre en avant des facteurs de conception qui permettent d'articuler ces enjeux dans le cadre d'un projet de conception sur technologie émergente pour l'enseignement. Ainsi, la recherche s'intéresse à une démarche participative mise en œuvre dans la conception conjointe d'un système technique (l'application sur table interactive) et des pratiques enseignantes (par l'intermédiaire de scénarios pédagogiques). Nos hypothèses concernent les effets de différents facteurs sur l'élaboration d'un compromis entre des enjeux d'intégration et d'innovation : implication de futurs utilisateurs « pionniers » ; opportunités de confrontation de leurs hypothèses de conception ; cadrage du champ des possibles.

Les analyses portent sur l'ensemble de la démarche de conception, afin de caractériser ces effets d'un point de vue longitudinal en les situant par rapport aux différentes méthodes mobilisées et à l'avancement des solutions de conception. En particulier, les justifications des choix de conception relatifs à certaines composantes de l'artefact en cours d'élaboration sont étudiées pour caractériser, d'une part, les facteurs de la conception qui ont contextualisé ces choix et, d'autre part, leurs liens avec les enjeux d'innovation ou d'intégration, voire les deux.

Les résultats montrent que :

- La mobilisation et la redéfinition des scénarios pédagogiques, l'implication d'enseignants en tant que co-concepteurs, la confrontation des solutions de conception sur prototype et en simulation et enfin le recueil des besoins favorisent la définition de caractéristiques techniques et l'intégration du système technique ;
- La définition des caractéristiques techniques de l'application, l'implication d'enseignants pionniers, l'identification de leurs besoins et la simulation des solutions favorisent l'adaptation des pratiques enseignantes aux caractéristiques de la technologie en vue d'optimiser son intégration ;
- Les différentes formes de confrontation à la nouvelle technologie ainsi que les apprentissages mutuels en conception participative vis-à-vis du potentiel technique et interactif des tables interactives contribuent à l'exploitation de ce potentiel par les concepteurs ;
- Les caractéristiques innovantes des tables interactives, l'anticipation de leurs usages potentiels en salle de classe, la mise en œuvre des solutions de conception en situation réelle, la participation d'enseignants futurs utilisateurs leur permettant de s'approprier la nouvelle technologie et l'identification de leurs difficultés actuelles favorisent l'innovation dans les scénarios pédagogiques et l'amélioration des activités d'enseignement et d'apprentissage.

Mots-clés : Conception participative, Innovation, TICE, Technologie émergente, Tables interactives, Interfaces tangibles

Résumé en anglais

Information and Communication Technologies have the potential for deeply transforming teachers' practices. However, this requires design solutions to be adapted to these practices and, at the same time, to foster innovations, in terms of improvements for teaching and learning activities.

This thesis aims at highlighting design factors that allow the articulation between these goals, in the context of a design project with emerging technologies for education. The research focuses on the design process: joint definition of a technical system (an application on an interactive tabletop) and of teaching practices (via pedagogical scenarios); involvement of future users; design hypothesis assessment modalities; framing the scope of design possibilities. Our hypotheses concern the potential effects of these factors in the reaching of a compromise between integration and innovation related goals.

Analyses cover the entire design process, in order to longitudinally examine the various design techniques used and the design process advancement. In particular, design choices related to some of the features of the artifact are analysed to investigate the links between design factors and integration/innovation related goals.

Results show that:

- Using and redefining pedagogical scenarios, involving users as co-designers, confronting the design solutions with prototypes and simulations and identifying users' needs facilitate the technical definition of the application and its integration in future teaching activities;
- Defining the technical properties of an artifact, involving teachers as experimenters, identifying their needs and simulating on the design solution foster the adaptation of teachers' practices to the specificities of the technologies and optimize its integration;
- Allowing participants to interact with the emerging technology in different ways and the mutual learning processes between designers, regarding tabletops technical and interactional potential, help them capitalize on this potential;
- Identifying the innovative features of tabletops, anticipating their potential uses, testing prototypes in real class situations and involving teachers, to let them learn how to use an emerging technology and to express the existing limits of their teaching practices, foster innovation in their pedagogical scenarios and, thus, can improve teaching and learning activities.

Keywords: Participatory design, Innovation, Education technologies, Emerging technologies, Interactive tabletops, Tangible User Interfaces

Table des matières

Remerciements **4**

Résumé **5**

Résumé en anglais **6**

Table des matières **7**

Liste des tableaux **13**

Liste des figures **14**

Liste des annexes **17**

Chapitre 1 Introduction **18**

1 Contexte général de la thèse **18**

1.1 Le projet Tactileo 18
1.2 Le Laboratoire des Interfaces Sensorielles et Ambiantes du CEA LIST 19

2 Enjeux du travail de thèse **20**

2.1 Dimension pragmatique 20
2.2 Dimension épistémique 21
2.3 Structure du document 22

Première partie : Cadre théorique **24**

Chapitre 2 Les TICE : Intégration, conception et formation **25**

1 État des lieux sur les TICE **26**

1.1 Enjeux et intérêts des TICE pour l'enseignement et l'apprentissage 26
1.2 Un bilan mitigé de l'intégration actuelle des TICE 29
1.3 Problèmes relevés et éléments de réponse 30
1.4 Importance de la formation des enseignants au numérique 32

2 Le modèle des TPACK, un modèle de connaissances pour la formation des enseignants **33**

2.1 Distinction préliminaire entre connaissances et savoirs 33
2.2 Le modèle PCK de Schulman 34
2.3 Le modèle TPACK de Koelher & Mishra 35
2.4 Développement des TPACK 37
2.5 Intérêt du modèle des TPACK en conception 39

3 La conception participative de l'enseignement : une source d'apprentissage **40**

3.1 La préparation du cours et des scénarios pédagogiques 41

3.2 Les activités de conception collective de l'enseignement 42
3.3 Les apprentissages en conception de TICE 43
3.3.1 L'approche Design-Based Research 43
3.3.2 L'approche Learning Technology by Design 44
3.4 Intérêt de cette dimension formative pour le travail de thèse 45

4 Les apprentissages en conception 46

4.1 Approche cognitiviste des activités de conception 46
4.1.1 La conception comme une activité de résolution de problème 46
4.1.2 La conception comme une activité de construction de représentations 47
4.2 La conception participative 49
4.2.1 Présentation générale 49
4.2.2 Les apprentissages en conception participative 50
4.3 Bilan sur les apprentissages en conception 52

5 Caractérisation des hypothèses de conception 53

6 Conclusion 55

Chapitre 3 La conception avec des technologies émergentes 57

1 Les tables interactives et les interfaces tangibles 57

1.1 Présentation générale 57
1.2 Les tables interactives et les interfaces tangibles, des technologies émergentes 60
1.3 Cadres théoriques sur les interactions tangibles 61
1.4 Les rôles de la manipulation physique dans l'apprentissage 63
1.5 Les activités collectives avec des tables interactives 64
1.6 Recommandations pour la conception de TICE avec des tables interactives 65
1.7 Synthèse sur les tables interactives pour l'enseignement et l'apprentissage 66

2 Construction conjointe d'un artefact et de ses usages 67

2.1 L'artefact et ses usages comme objets de l'activité de conception 67
2.1.1 La notion d'artefact 67
2.1.2 Conception d'un artefact et développement de l'activité 68
2.1.3 Intérêt de l'approche instrumentale pour l'étude des activités de conception 69
2.2 Évolution et caractérisation de l'objet de la conception 71
2.2.1 Les *objets intermédiaires* de la conception 71
2.2.2 Les scénarios d'usage 72
2.2.3 Décomposition du dispositif de formation à concevoir 74
2.3 Bilan 76

3 Conception avec des technologies émergentes 77

3.1 Un besoin d'apprentissage des technologies émergentes 77
3.2 Contexte « Technology-push » et ergonomie prospective 78
3.3 Analyse des besoins avec une technologie émergente 79
3.4 Bilan sur le processus de conception sur technologie émergente 82

4 Conception centrée utilisateur et co-conception 82

4.1 La conception centrée utilisateur 83
4.2 La co-conception 85
4.3 L'analyse des besoins en co-conception 86

4.4 Bilan et choix terminologiques 88
5 Conclusion 89
Deuxième partie : Problématique 91
Chapitre 4 Problématique 92
1 Mise en lumière des processus d'intégration et d'innovation en conception 92
2 Liens potentiels entre méthodes de conception et processus d'intégration/innovation 93
2.1 La construction conjointe du système technique et des pratiques enseignantes 94
2.2 L'implication de participants en conception 95
2.3 La confrontation des hypothèses de conception 96
2.4 Le cadrage du champ des possibles 97
3 Questions de recherche 98
4 Stratégie de recherche 99
Troisième partie : Partie empirique 102
Chapitre 5 Cadrage initial de la situation cible de la conception 103
1 Anticipation des usages potentiels des tables interactives pour l'enseignement 103
1.1 Étude préliminaire sur les disciplines pouvant bénéficier des tables interactives 104
1.1.1 Méthode 104
1.1.2 Principaux résultats 105
1.2 Prospection sur des usages potentiels dans les disciplines scientifiques 105
1.2.1 Méthode 105
1.2.2 Résultats 107
1.3 Discussion 108
1.4 Intérêt des usages anticipés pour la conception 108
2 Analyse de la tâche d'enseignants de physique-chimie 109
2.1 Contenu des programmes scolaires 109
2.2 Un tronc commun aux disciplines scientifiques et technologiques 109
2.3 L'enseignement de la physique-chimie au collège 110
2.4 Variabilité des situations d'enseignement et d'apprentissage en physique 111
3 Précision de la situation cible de la conception 112
Chapitre 6 Analyse des besoins avec le modèle des TPACK 113
1 Le prescrit des programmes scolaires 114
2 Étude d'une situation de référence d'enseignement en physique 115
3 Résultats 117
3.1 Résumé de la séquence d'enseignement de l'optique en 4è 117

3.2 Besoins relevés et connaissances associées 121
4 Synthèse des résultats 126
Chapitre 7 Présentation de la démarche de conception participative 128
1 La démarche de conception participative 130
1.1 Les réunions de conception participatives 130
1.1.1 Objectifs 130
1.1.2 Participants impliqués dans les réunions de conception 131
1.1.3 Matériel 134
1.1.4 Données recueillies 134
1.2 Travail réalisé entre les réunions de conception 134
1.2.1 Tâches du GT de l'IFÉ 134
1.2.2 Tâches des ergonomes et du développeur 135
1.2.3 Données recueillies 135
1.3 Les phases expérimentales en classes avec les tables interactives 135
1.3.1 Objectifs 135
1.3.2 Participants 136
1.3.3 Matériel 136
1.3.4 Données recueillies 136
1.3.5 Récapitulatif des expérimentations en classes 137
1.4 Synthèse du processus de conception global 138
1.5 Bilan sur les méthodes de conception au regard de la problématique 139
2 Résultats productifs de la conception 139
2.1 L'application tangible de simulation en optique 140
2.1.1 La simulation tangible 140
2.1.2 La modélisation associée à la simulation 145
2.1.3 Les autres fonctions de l'application tangible 147
2.2 La séquence d'enseignement reformulée pour intégrer l'artefact 147
3 Liens entre produits de la conception et processus d'intégration et d'innovation ... 149
4 Synthèse des résultats et intérêts d'une étude longitudinale de la conception 152
Chapitre 8 Analyse des liens entre méthodes de conception et processus d'intégration, d'innovation et d'apprentissage 154
1 Grille d'analyse de l'activité des concepteurs 155
1.1 Rappel sur la structure des hypothèses de conception 155
1.2 Décomposition de l'activité de conception 155
1.3 Intérêt pour la caractérisation des méthodes de conception 156
2 Stratégie d'analyse 159
2.1 Sélection des composantes représentatives de la solution à analyser 159
2.1.1 Les sources lumineuses tangibles 160
2.1.2 Le cadre de modélisation 161
2.1.3 La projection de l'interface 162
2.2 Décomposition du processus en phases de conception 163

2.2.1 Données recueillies et traitements effectués 163
2.2.2 Découpage préliminaire de l'activité de conception en 9 phases 163
2.3 Analyse des verbalisations des concepteurs 166
2.3.1 Description du codage 166
2.3.2 Description des traitements effectués sur les hypothèses de conception 167

3 Résultats 169

3.1 Résultats détaillés pour chaque phase de la conception 169
3.1.1 Construire un référentiel commun entre participants et ergonomes 169
3.1.2 Recueillir des attentes initiales et faire émerger des exigences vis-à-vis des tables interactives 171
3.1.3 Reformuler les scénarios existants et formuler des exigences 173
3.1.4 Affiner les choix de conception initiaux pour les reformuler en spécifications. 178
3.1.5 Confronter les participants au prototype afin d'étoffer les spécifications 181
3.1.6 Préparer les expérimentations en classe 185
3.1.7 Simuler l'activité future de l'activité de l'enseignant en classe 187
3.1.8 Mettre en œuvre des solutions en situation réelle 190
3.1.9 Faire le bilan sur les expérimentations en classe 193
3.2 Synthèse des résultats 197
3.2.1 Caractéristiques des choix de conception sur l'ensemble de la démarche 197
3.2.2 Synthèse des méthodes et des processus d'intégration/innovation par phase 198
3.2.3 Liens entre méthodes de conception et processus d'intégration/innovation 200
3.2.4 Liens entre méthodes de conception et processus d'apprentissage 206
3.2.5 Liens entre apprentissages et processus d'intégration/innovation 211

4 Conclusion 211

Chapitre 9 Discussion générale et conclusion 214

1 Discussion des réponses apportées aux questions de recherches 214

1.1 En quoi les solutions de conception rendent-elles compte de processus d'intégration et d'innovation ? 214
1.2 Dans quelle mesure les méthodes utilisées en conception favorisent-elles les processus d'intégration et d'innovation ? 215
1.3 En quoi les méthodes de conception permettent-elles d'engager des apprentissages chez les enseignants concepteurs ? 216
1.4 En quoi les apprentissages influent-ils sur les processus d'intégration et d'innovation ? 218

2 Perspectives 219

2.1 Recommandations pour la conception de TICE sur technologie émergente 219
2.1.1 Construire conjointement le système technique et les pratiques enseignantes .. 219
2.1.2 Favoriser l'implication d'enseignants et la confrontation de leurs hypothèses . 220
2.2 Limites du traitement de traces productives 220
2.3 Bilan et perspectives sur les acteurs de la conception 221
2.3.1 Impact des spécificités des participants impliqués 221
2.3.2 Rôle des ergonomes dans la démarche 222
2.3.3 Perspectives sur l'implication d'élèves en conception 222
2.4 Perspectives concernant les tables interactives et les objets tangibles 223
2.4.1 Impact des technologies émergentes sur l'activité des élèves 223
2.4.2 Impact des objets tangibles sur l'activité des concepteurs 224

3 Conclusion 224

Bibliographie 226

Annexes 239

Résumé 260

Résumé en anglais 260

Liste des tableaux

Tableau 1. Comparaison des deux métaphores de l'apprentissage adapté de Sfard (1998)..... 41
Tableau 2. Liens entre hypothèses de conception et représentations des concepteurs 54
Tableau 3. Synthèse des effets attendus des hypothèses 98
Tableau 4. Extrait du programme scolaire relatif à la partie sur l'optique considérée pour la conception 114
Tableau 5. Grille de codage des verbalisations relatives aux besoins des participants..... 116
Tableau 6. Synthèse des besoins généraux relevés dans l'analyse des besoins 126
Tableau 7. Récapitulatif des expérimentations en classes avec les tables interactives 138
Tableau 8. Résumé des caractéristiques des résultats de la conception par rapport aux processus d'intégration/innovation 150
Tableau 9. Synthèse des différentes phases de la conception 165
Tableau 10. Grille de codage des choix de conception 166
Tableau 11. Grille de codage des justifications des choix de conception 167
Tableau 12. Grille de codage des processus de conception 167
Tableau 13. Bilan des caractéristiques méthodologiques de la phase de construction du référentiel commun 169
Tableau 14. Méthodes et des processus de conception dans la phase de recueil des attentes 171
Tableau 15. Méthodes et des processus de conception dans la phase de reformulation des scénarios existants et de formulation d'exigences sur l'application tangible 174
Tableau 16. Méthodes et des processus de conception dans la phase d'affinage des exigences en spécifications 178
Tableau 17. Méthodes et des processus de conception dans la phase de confrontation des participants au prototype 182
Tableau 18. Méthodes et des processus de conception dans la phase de préparation des expérimentations en classe 185
Tableau 19. Méthodes et des processus de conception dans la phase de simulation de l'activité future de l'enseignant 188
Tableau 20. Méthodes et processus dans la phase d'expérimentation en classe 190
Tableau 21. Méthodes et des processus de conception dans la phase de bilan sur les expérimentations en classe 194
Tableau 22. Synthèse des méthodes de conception et des processus d'intégration/innovation de chaque phase 199

Liste des figures

Figure 1. Exemple de classes Tactileo avec plusieurs tables numériques, des tablettes, des objets et un TNI 19
Figure 2. (à g.) Table interactive SUR40 de Samsung ; (à d.) Exemple de simulation tangible de l'observation de la lumière du soleil avec un spectroscope à travers un filtre bleu 20
Figure 3. Le modèle *Technological Pedagogical Content Knowledge* (Koehler, Mishra & Yahya, 2007, p. 3) 36
Figure 4. Exemple de taxinomie pour les interfaces tangibles (Ullmer & al., 2005, p. 83) 59
Figure 5. Exemples d'interfaces tangibles : *TViews* (Mazalek, 2006) ; Price & al. (2009) ; *ReacTable* (Jordà & al., 2007) ; Active Desk (Fitzmaurice & al., 1995) 60
Figure 6. Continuum de cohérence d'une interface tangible (Koleva & al., 2003, p. 47) 62
Figure 7. Cadre d'analyse des interactions tangibles pour l'apprentissage de Price & al. (2009, p. 85) 63
Figure 8. La boucle de la conception (Rabardel, 1995, p. 164) 71
Figure 9. Cycle de conception centrée utilisateur 84
Figure 10. Synthèse du processus d'analyse des besoins (Couix, 2012, p. 31) 86
Figure 11. Démonstrateur tangible sur table interactive utilisé par les participants de l'atelier créatif 106
Figure 12. Le spectroscope utilisé par les élèves et le spectre de la lumière blanche affiché par l'enseignant 118
Figure 13. Modélisation des phénomènes optiques abordés dans le TP-cours 3 à recopier par les élèves 119
Figure 14. Modèle énergétique de la lumière présenté aux élèves à la fin du TP-cours 5 120
Figure 15. Exemple de logiciel de simulation pour aborder la synthèse additive des lumières colorées 121
Figure 16. Synthèse du déroulement temporel de l'activité de conception 129
Figure 17. Exemple de simulation de la synthèse additive des lumières colorées dans le cas de sources de lumière bleue et rouge reflétées sur un objet blanc qui sert d'écran 130
Figure 18. Exemples de données vidéo recueillies en classe par 3 caméras avec des points de vue différents dans la classe de l'enseignant A 137
Figure 19. Résumé de la démarche de conception 138
Figure 20. Exemple d'objets tangibles 140
Figure 21. Exemples de sources de lumière spécifiques (à gauche) et générique (à droite) .. 141

Figure 22. Exemple de simulation de l'observation du spectre de la lumière du soleil et d'un néon 143
Figure 23. Exemples de l'observation simulée d'objets opaques 143
Figure 24. Simulation de l'observation de la lumière du soleil avec un spectroscope à travers un filtre bleu ou vert 144
Figure 25. Exemples de l'observation simulée de sources lumineuses derrière des filtres ... 144
Figure 26. Exemple de simulation de la synthèse additive des lumières colorées 145
Figure 27. Exemples de modélisation de la simulation 146
Figure 28. Exemples de sources de lumière spécifiques (à gauche) et génériques (à droite) 160
Figure 29. Évolution de la source de lumière tout au long des réunions de conception 161
Figure 30. Exemples de modélisation de la simulation 161
Figure 31. Évolution de la modélisation tout au long des réunions de conception 162
Figure 32. Décomposition des réunions de conception en phases 164
Figure 33. Exemple de modification de la modélisation de la lumière : du modèle du rayon lumineux vers une représentation selon les 3 couleurs primaires (rouge, vert, bleu) 168
Figure 34. Processus engagés dans la phase de recueil des attentes initiales et des premières exigences 172
Figure 35. Connaissances mobilisées dans la phase de recueil des attentes 172
Figure 36. Dimensions des choix de conception dans la phase de reformulation des scénarios pédagogiques et de formulation des exigences initiales sur l'application tangible..... 174
Figure 37. Connaissances mobilisées dans la phase de reformulation des scénarios pédagogiques et formulation d'exigences techniques 176
Figure 38. Processus engagés dans la phase de reformulation des scénarios pédagogiques et de formulation d'exigences techniques 178
Figure 39. Dimensions des choix de conception dans la phase d'affinage des choix de conception initiaux pour les reformuler en spécifications techniques 179
Figure 40. Processus engagés dans la phase d'affinage des choix de conception 179
Figure 41. Connaissances mobilisées dans la phase d'affinage des choix de conception 181
Figure 42. Dimensions des choix de conception dans la phase de confrontation des participants au prototype afin d'étoffer les spécifications 182
Figure 43. Connaissances mobilisées dans la phase de confrontation des participants au prototype..... 184
Figure 44. Processus engagés de la phase de confrontation des participants au prototype.... 184

Figure 45. Dimensions des choix de conception dans la phase de préparation des expérimentations en classe 185
Figure 46. Connaissances mobilisées dans la phase de préparation des expérimentations en classe 186
Figure 47. Processus engagés dans la phase de préparation des expérimentations en classe 187
Figure 48. Processus engagés dans la phase de simulation de l'activité future des enseignants 189
Figure 49. Connaissances mobilisées dans les phases de simulation de l'activité future des enseignants 190
Figure 50. Dimensions des choix de conception dans la phase d'expérimentation en classe 191
Figure 51. Connaissances mobilisées dans la phase de mise en œuvre de la solution en situation réelle 192
Figure 52. Processus engagés dans la phase d'expérimentation en classe 193
Figure 53. Dimensions des choix de conception dans la phase de bilan sur les expérimentations en classe 194
Figure 54. Processus engagés dans la phase de confrontation des résultats des expérimentations en classe 196
Figure 55. Synthèse du nombre de choix de conception par phase 197
Figure 56. Processus d'intégration et d'innovation sur toute la démarche de conception 200
Figure 57. Répartition des types de processus d'intégration/innovation par phase 200
Figure 58. Répartition des connaissances mobilisées selon les catégories du modèle TPACK 206
Figure 59. Principales connaissances mobilisées dans les phases de l'activité de conception 208
Figure 60. Types de connaissances mobilisées selon les dimensions des choix de conception 210

Liste des annexes

Annexe 1 : Variabilité de l'enseignement-apprentissage 239

Annexe 2 : Principes physiques sous-jacents en optique de 4e 242

Annexe 3 : Codage des verbatim du chapitre 8 244

Annexe 4 : Documents « élèves » représentant les scénarios pédagogiques finaux 255

Chapitre 1 INTRODUCTION

1 Contexte général de la thèse

Les travaux décrits dans le présent document s'inscrivent dans le cadre d'une démarche de conception d'un dispositif numérique mobilisant des technologies émergentes pour la formation en milieu scolaire. Ils s'inscrivent plus largement dans le cadre du projet Tactileo visant à favoriser le développement des pratiques d'enseignement et d'apprentissage actuelles par l'intégration de technologies innovantes.

1.1 Le projet Tactileo

Le projet Tactileo[1] est lauréat de l'appel à projet E-Education lancé par le ministère de l'Éducation Nationale dans le cadre des Investissement d'Avenir en 2012. Il a pour ambition de réunir les interfaces tactiles d'une classe (tablettes tactiles, smartphones, tableaux numériques interactifs et tables numériques) au sein d'un écosystème numérique (cf. Figure 1). Celui-ci doit permettre leur synchronisation de manière transparente afin d'opérer une rupture pédagogique autour de ces outils numériques. Sa motivation principale réside dans le constat commun des partenaires du projet que le numérique se développe à l'école, mais que l'innovation pédagogique induite reste trop faible : les écrans scolaires sont trop souvent mobilisés comme des supports documentaires qui consolident une relation frontale et individuelle au savoir.

Le projet rassemble des industriels, des organismes de recherche et des spécialistes reconnus dans leurs domaines respectifs. Dans le cadre de ce travail de thèse, nos propos porteront principalement sur le CEA LIST, dans lequel s'est déroulé la composante pragmatique du travail de thèse et l'Institut Français de l'Éducation (IFÉ).

[1] http://eductice.ens-lyon.fr/EducTice/recherche/tactileo

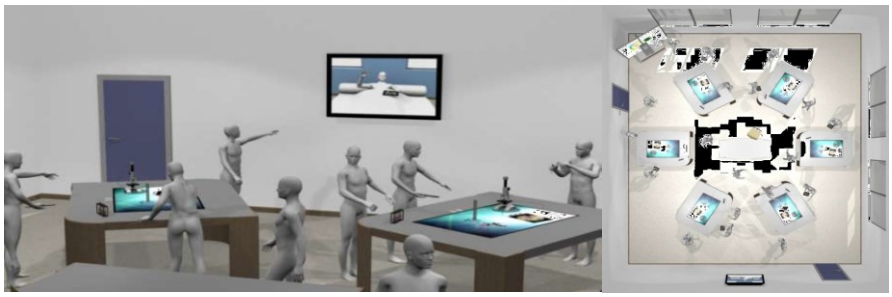


Figure 1. Exemple de classes Tactileo avec plusieurs tables numériques, des tablettes, des objets et un TNI

1.2 Le Laboratoire des Interfaces Sensorielles et Ambiantes du CEA LIST

La thèse de doctorat en ergonomie dont rend compte le présent document est financée par un des partenaires du projet : le Laboratoire des Interfaces Sensorielles et Ambiantes (LISA) du CEA LIST. Le CEA, pour Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives, intervient dans quatre grands domaines : les énergies bas carbone ; les Très Grandes Infrastructures de Recherche (TGIR) ; la défense et la sécurité globale ; les technologies pour l'information et les technologies pour la santé. L'institut CEA LIST, pour Laboratoire d'Intégration des Systèmes et Technologies, s'inscrit dans ce dernier domaine.

Le LISA développe toute une gamme d'interfaces innovante pour enrichir l'interaction et mène des développements amont sur de nouvelles technologies de capture, d'actionnement et de localisation. Il s'appuie sur un ensemble de compétences pluridisciplinaires, notamment en ingénierie et en ergonomie, autour des Interactions Homme-Machine.

Dans le cadre du projet Tactileo, le LISA intervient à différents niveaux de la conception et s'intéresse à la fois aux dimensions matérielles et logicielles de l'artefact à concevoir ainsi qu'à ses usages futurs. En ce qui concerne le travail de thèse, un objectif pragmatique était de participer à la conception d'une *application tangible* sur *table interactive* (cf. Figure 2). Celle-ci était dédiée à l'enseignement et à l'apprentissage de l'optique en classe de 4^{e} au collège et devait faire l'objet d'expérimentations en classes pour évaluer les résultats de la conception.

Sur le plan technique comme sur celui des usages, les tables interactives sont des technologies peu matures par comparaison, par exemple, aux ordinateurs ou aux tablettes tactiles. Cependant, elles présentent un intérêt pour la recherche sur les technologies numériques en

milieu scolaire dans la mesure où elles sont dotées de caractéristiques singulières, en particulier les interactions tangibles. L'introduction de telles technologies dans des classes soulève de nombreuses questions quant à la transformation des activités d'enseignement et d'apprentissage actuelles, ce qui a donné lieu à la création d'une offre de thèse sur le sujet.

2 Enjeux du travail de thèse

2.1 Dimension pragmatique

Compte tenu des objectifs du projet Tactileo et du caractère peu répandu et peu connu des tables interactives, une démarche de conception participative a été mise en place. Son objectif était de concevoir un logiciel de simulation pour l'enseignement d'une partie du programme de physique au collège, plus spécifiquement en optique, sur la décomposition de la lumière blanche (cf. Figure 2).

Le processus de conception a duré plus de deux ans avec des réunions tous les deux mois en moyenne et deux phases d'expérimentation en classe. Il a mobilisé des ergonomes, des enseignants, une enseignante-chercheure en didactique et un développeur.

Au-delà de l'aspect technique de l'application en cours de conception, l'activité de conception a également porté sur l'adaptation des pratiques d'enseignement existantes afin d'y intégrer la technologie. Ainsi, une séquence d'enseignement a été remaniée et les scénarios pédagogiques utilisés par les enseignants ont été reformulés puis testés en situation réelle.



Figure 2. (à g.) Table interactive SUR40 de Samsung ; (à d.) Exemple de simulation tangible de l'observation de la lumière du soleil avec un spectroscope à travers un filtre bleu

La durée du projet de conception renvoie notamment à la complexité de l'activité de conception sur ce type de technologie. D'une part, la technologie manquait de maturité et, d'autre part, la spécification des différentes caractéristiques du dispositif technique et des scénarios pédagogiques a demandé du temps pour arriver à un résultat cohérent et pertinent.

Cet empan temporel est également lié à la nature du projet Tactileo qui visait à s'appuyer sur des travaux de recherche dans plusieurs domaines. L'objectif était d'optimiser les résultats de la conception, ce qui a requis des marges de manœuvre conséquentes au niveau temporel pour les concepteurs. Cela a permis d'aborder certaines questions en profondeur, telles que les représentations potentiellement induites par la technologie ou le lien entre l'expérience réelle, la simulation informatique et la modélisation physique.

2.2 Dimension épistémique

Le processus de conception présente des caractéristiques qui en faisaient un objet d'étude digne d'intérêt pour plusieurs raisons :

- L'introduction du numérique dans le milieu éducatif représente une priorité actuelle pour les instances dirigeantes, mais différents facteurs semblent y faire obstacle. Leur intégration dans les pratiques d'enseignement et d'apprentissage existantes, la formation des enseignants et la perception des plus-values potentielles des outils informatiques constituer représentent en effet des limites actuelles à l'intégration de TICE. Elles constituent pour l'ergonomie, comme pour les sciences de l'éducation ou la didactique, un objet d'étude et d'intervention pertinent pour identifier des modalités permettant de les surmonter ;
- La technologie choisie présente un caractère innovant et peu connu pour laquelle les propriétés matérielles et logicielles étaient à définir. Concrètement, les tables interactives sont encore marginales en classe par rapport à des dispositifs numériques tels que les ordinateurs, les vidéoprojecteurs, les tableaux numériques interactifs ou les tablettes tactiles. Cependant, elles présentent des caractéristiques potentiellement intéressantes pour le développement des activités d'enseignement et d'apprentissage : taille permettant le travail en groupes, accueil d'éléments tangibles (3D) et représentations numériques (2D) ;
- L'empan temporel du processus de conception prévu dans le projet constitue une opportunité d'analyse longitudinale du processus de conception en situation innovante, à la fois au niveau productif et au niveau constructif. Le premier niveau concerne

l'avancement de l'objet de la conception, les méthodes mises en œuvre, les phases identifiables. Le second traite de l'évolution des connaissances des participants dans la mesure où les activités de conception participative peuvent être source d'apprentissage ;

- L'objet de la conception participative porte sur la spécification technique de l'artefact et l'adaptation de scénarios pédagogiques. Il se distingue donc de projets de conception dont le résultat productif est purement technique. Il semble donc intéressant d'étudier ces deux composantes pour rendre compte de la construction conjointe du contenu de l'interface et des usages qui en seront faits du point de vue de l'enseignant et des élèves.

Le travail de recherche vise à prendre en compte ces points d'intérêt. D'une part, il porte sur l'activité de conception à proprement parler, concernant l'élaboration conjointe de l'application tangible et de scénarios pédagogiques, d'un point de vue longitudinal. D'autre part, il s'intéresse aux effets de l'activité de conception et du caractère émergent de la technologie sur les pratiques professionnelles des participants. Nous entendons par « effets » les questions d'intégration et d'innovation permettant le développement professionnel.

L'enjeu de cette thèse est de mettre en avant les caractéristiques des méthodes de conception permettant d'articuler les processus d'innovation dans les pratiques enseignantes et d'intégration d'une application sur technologie émergente. Les Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Enseignement (TICE) peuvent en effet transformer profondément les pratiques pédagogiques. Cependant, pour que ce bénéfice potentiel se réalise, il faut que les solutions produites en conception puissent à la fois s'intégrer à ces pratiques et être sources d'innovation potentielle, en termes de plus-values pour les activités d'enseignement et d'apprentissage.

2.3 Structure du document

Le chapitre 2 dresse un rapide bilan sur les TICE à l'heure actuelle. Il met en avant les principaux obstacles à leur intégration et l'importance de la formation des enseignants pour les surmonter. Ce chapitre aborde ensuite la conception pour l'enseignement, notamment celle des TICE. Il présente ensuite plus largement les activités de conception participatives, le rôle des représentations des concepteurs et celui des apprentissages en conception. Le chapitre 3 décrit les tables interactives et les interactions tangibles, ainsi que leurs apports potentiels pour l'enseignement et l'apprentissage. L'intérêt de considérer à la fois l'artefact technique à concevoir et ses futurs usages est ensuite présenté, ainsi que l'impact potentiel des nouvelles

technologies mobilisées sur la conception. Enfin, des processus de conception plus classiques sont mobilisés afin de participer à la caractérisation de notre démarche de conception.

Le chapitre 4 décrit la problématique de la thèse et la stratégie de recherche.

Le chapitre 5 présente les travaux réalisés en amont de la conception qui ont permis de préciser une situation à transformer par la conception à travers un atelier de créativité, une analyse documentaire et des études exploratoires. Le chapitre 6 décrit la situation de travail à transformer : l'enseignement et l'apprentissage de l'optique en 4^{e} en cours de physique. Il propose une analyse des besoins dans une situation de référence qui a été reprise en conception. Le chapitre 7 propose une synthèse du processus de conception mis en œuvre et ses résultats concernant l'application tangible et les scénarios pédagogiques conçus. Le chapitre 8 décompose la démarche de conception en phases et analyse les hypothèses de conception des acteurs du projet afin de repérer les caractéristiques méthodologiques ayant joué sur les processus d'intégration et d'innovation et les apprentissages en conception.

Enfin, le chapitre 9 conclut par rapport à la problématique en discutant des travaux présentés dans cette thèse et de ses perspectives.

Première partie : Cadre théorique

Chapitre 2 LES TICE : INTEGRATION, CONCEPTION ET FORMATION

Ce chapitre porte sur différents aspects des activités d'enseignement avec des TICE : leur intégration actuelle dans les établissements scolaires, la formation des enseignants ainsi que leur conception par des enseignants et les apprentissages que cela induit.

La première partie fait un état des lieux sur les TICE, avec les enjeux du numérique, leurs apports, constatés ou potentiels, ainsi que les obstacles à leur intégration dans les activités d'enseignement et d'apprentissage.

Dans la seconde partie, un modèle décrivant les types de connaissances des enseignants relatives à leurs pratiques professionnelles avec des TICE est présenté. Il met en lumière les articulations possibles entre les connaissances relatives à une technologie donnée et celles qui portent sur le contenu à enseigner ou les pratiques pédagogiques des enseignants.

La troisième partie aborde les activités de conception impliquant des enseignants. Elle met en avant leur impact potentiel sur l'intégration des TICE en classe et sur la transformation des pratiques d'enseignement par le biais des formes d'apprentissage induites chez ces enseignants concepteurs.

Dans la dernière partie de ce chapitre, les activités de conception participatives sont présentées d'un point de vue plus général, à partir de travaux existants en ergonomie. Les résultats des travaux mentionnés mettent en avant les formes d'apprentissage liées à ce type d'activité.

1 État des lieux sur les TICE

Les Technologies de l'Information et de la Communication, ou TIC, ont commencé à être introduites dans les établissements scolaires français il y a près de 50 ans. Elles ont depuis fait l'objet de nombreuses initiatives institutionnelles à grande échelle visant leur déploiement (Bernard, Ailincai & Baur. 2010).

Au début des années 1990, l'acronyme *TICE*, pour *Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Enseignement* apparaît (Baron, 1994). Le numérique continue de faire l'objet de plans d'équipement à cette période, en particulier grâce à l'arrivée du multimédia, des cédéroms et d'internet. Les outils informatiques sont largement diffusés dans la société, au-delà du système éducatif, avec des logiciels bureautiques ou ludiques notamment. En parallèle, les technologies de l'information et de la communication sont progressivement intégrées à la formation des enseignants.

Au début des années 2000, le « *Brevet Informatique et Internet* », ou B2i, apparaît et se généralise de l'école primaire au lycée. Il est suivi du « *Certificat Informatique et Internet* » pour les étudiants et sa version professionnelle est obligatoire depuis 2008 pour les professeurs des écoles stagiaires. La volonté générale sous-jacente à ces diplômes est de limiter la fracture numérique pour l'ensemble des élèves français, c.-à-d. les inégalités d'accès et d'usage des technologies de l'information et de la communication.

1.1 Enjeux et intérêts des TICE pour l'enseignement et l'apprentissage

Plusieurs raisons peuvent expliquer le choix des instances dirigeantes de déployer les TIC dans le milieu éducatif. En 2010, Fourgous présente un rapport de mission parlementaire sur la modernisation de l'école par le numérique intitulé « *Réussir l'école numérique* ». Il décrit trois motivations pour l'informatisation des établissements scolaires :

- Améliorer la qualité de l'enseignement et des résultats scolaires ;
- Former les élèves aux outils numériques pour qu'ils aient les compétences-clés indispensables à leur réussite sur le marché du travail ;
- Améliorer l'efficacité de l'administration et de la gestion des établissements scolaires.

À ces trois motivations s'ajoute le besoin de former les élèves à un usage responsable des réseaux et des services numériques dans une société de l'information et de la communication en rapide évolution. Les travaux présentés dans ce document sont focalisés sur le premier type de motivation parmi celles décrites plus haut, c'est-à-dire aux apports du numérique pour les activités d'enseignement et d'apprentissage en milieu scolaire.

Compte tenu du nombre et de la diversité des technologies actuelles et des différentes disciplines enseignées, de nombreux travaux de recherche ont été menés sur le sujet. Alluin (2010) a par exemple montré que les usages TICE sont jugés importants par les enseignants pour atteindre des objectifs pédagogiques tels que : *participer à la formation aux principes et fonctionnalité de l'informatique, mettre en œuvre le B2i, stimuler la curiosité, apprendre aux élèves à travailler à distance, accroître la motivation à apprendre* et *apprendre aux élèves à devenir autonomes*. Les principales compétences dont l'acquisition est visée à travers l'usage des TICE dépendent néanmoins de la discipline enseignée : *savoir chercher* dans les enseignements littéraires, *expérimenter* en sciences et *analyser* en éducation physique et sportive ou dans les disciplines artistiques. D'après les enseignants interrogés, les TICE auraient un effet positif sur les aptitudes des élèves pour *acquérir des connaissances, chercher l'information, être motivé, être curieux, être autonome* et *comprendre.* Concernant leurs pratiques d'enseignement, les TICE sont cependant jugées néfastes par rapport à la *charge de travail* et au *temps nécessaire pour résoudre les problèmes techniques* supplémentaires qu'elles induisent. En revanche, elles apparaissent bénéfiques par exemple pour *la diversité des activités proposées aux élèves, la variété et la qualité des ressources utilisées* et *la variété des situations d'apprentissage*. De leur côté, les élèves jugent l'ordinateur utile et estiment être *aidés, actifs* et *contents* lorsqu'ils l'utilisent en classe.

Dans une étude sur l'usage d'Ipads, Karsenti & Fievez (2013) ont identifié des avantages de ces dispositifs auprès d'élèves et d'enseignants : *motivation accrue des élèves, accès à l'information, portabilité de l'outil, annotation de documents, organisation du travail plus aisée, qualité des présentations réalisées par les élèves ou l'enseignant, collaboration accrue entre élèves et avec l'enseignant, créativité soutenue, variété des ressources présentées, possibilité d'aller à son rythme, développement de compétences informatiques chez les élèves et les enseignants, expérience de lecture améliorée* et *économie de papier pour l'enseignant.*

Plus généralement, le numérique présente un intérêt pour transformer les pratiques d'enseignement et d'apprentissage. Il peut donner accès à des contenus supplémentaires pour l'enseignant, à des modalités de représentations alternatives ou à des supports d'apprentissage

nouveaux pour les élèves. Internet en est une bonne illustration dans la mesure où il rend possibles des activités de recherche, d'exploration et d'exploitation d'informations (Bétrancourt, 2007) jusque-là plus difficile à mettre en œuvre en milieu scolaire.

Si certains objectifs sont transverses à toutes les disciplines, d'autres sont plus spécifiques aux disciplines enseignées (Alluin, 2010). Dès lors, les besoins en termes de TICE varient : un logiciel de traitement de données présente peu d'intérêt, a priori, pour l'enseignement des langues. Néanmoins, pour répondre à ces différents besoins, la diversité des dispositifs technologiques existants a été mise à contribution. Ainsi, un éventail considérable de TICE est apparu proposant quantité de solutions matérielles et logicielles. Parmi les plus répandues, on peut citer :

- Les plateformes d'apprentissage en ligne ou E-learning, qui facilitent l'accès à des ressources pédagogiques grâce à internet ainsi que le travail collectif à distance ;
- Les Espaces Numériques de Travail (ENT) qui ont un rôle principalement pédagogique en proposant aux élèves, parents, personnels enseignants et non-enseignant des services liés à l'éducation et à l'accompagnement des élèves (p. ex. Bruillard, 2011) ;
- les Tableaux Blancs Interactifs (TBI) qui combinent les fonctions d'un vidéoprojecteur et d'un écran tactile et qui permettent d'afficher des contenus à partir d'un ordinateur (p. ex. Miller & Glover, 2013) ;
- Les tablettes tactiles (p. ex. Giroux, Coulombe, Cody & al, 2013 ; Karsenti & Fievez, 2013 ; Villemonteix & Khaneboubi, 2012) ;
- Les MOOCs (Massively Online Open Courses), qui peuvent se traduire par « formation en ligne ouverte à tous », destinés à un grand nombre d'utilisateurs en reprenant le principe du E-learning (p. ex. Cisel & Bruillard, 2012).

Ces exemples proposent des fonctions diverses et renvoient à des usages variés : utilisation individuelle ou collective, par des élèves et/ou un enseignant, en classe ou à distance, avec des objectifs principalement didactiques ou pédagogiques, etc. De Vries (2001) répertorie différents types de logiciels d'apprentissage, chacun étant rattaché à des fonctions pédagogiques et des tâches types, ainsi qu'à des approches théoriques et des types de connaissances particulières. Il met ainsi en lumière la diversité des outils numériques disponibles et des exemples de situations dans lesquelles ils peuvent être mis en œuvre. Par la suite, Burkhardt & Lourdeaux (2003) ont réalisé une étude visant à montrer les apports potentiels de différents types d'*Environnement Individuel d'Apprentissage Humain* (EIAH).

Ces travaux montrent qu'il existe à l'heure actuelle de nombreux dispositifs numériques dédiés à l'enseignement ou à l'apprentissage et qu'ils visent des objectifs différents. Par conséquent, en conception de TICE, ces objectifs doivent être clairement identifiés ciblés au regard de la technologie choisie afin d'en assurer leur intégration, mais plus encore une amélioration des activités d'enseignement et d'apprentissage.

1.2 Un bilan mitigé de l'intégration actuelle des TICE

Compte tenu de l'intérêt potentiel des TICE, on aurait pu s'attendre à ce que le numérique soit aujourd'hui omniprésent dans les établissements scolaires. Cependant, le bilan réel est plus mitigé. Dans son rapport, Fourgous (2010) décrit des limites actuelles à l'intégration des TICE. Malgré les mesures mises en place depuis plus de 40 ans, son bilan sur le numérique dans l'éducation met en évidence le retard de la France par rapport à d'autres pays européens tels que le Royaume-Uni ou le Danemark. Il insiste sur le besoin d'intégrer davantage de TICE dans le système éducatif. Il s'appuie pour cela sur des témoignages d'enseignants ou de directeurs d'établissements qui rapportent les bénéfices du numérique constatés lors d'expérimentations.

En 2011, l'enquête nationale PROFETIC (PROFesseurs et Technologies de l'Information et de la Communication [Chambon & Le Berre, 2011]) est lancée par le ministère de l'Éducation nationale, de l'enseignement supérieur et de la recherche, concernant les pratiques des enseignants avec le numérique. Cette enquête a été menée sur 3 ans auprès de 5000 enseignants de collège, lycée et lycée professionnel. Elle porte sur leur usage des TICE, en particulier sur des questions d'accès, de fréquences d'utilisation, de perception de leur utilité ou de satisfaction. Un résultat particulièrement intéressant décrit les ressources numériques existantes comme sous-exploitées alors que 90 % des enseignants jugent le numérique profitable à leur enseignement.

Ce type de résultat est d'ailleurs confirmé par la recherche (p. ex. Hoyle & Lagrange, 2009). Artigues (2013) fait un constat similaire dans l'enseignement des mathématiques. Initialement, une attente générale associée aux TICE était qu'elles devaient apporter un changement rapide et profond dans les formes et les contenus de l'enseignement de cette discipline. Par la suite, des études expérimentales positives ont renforcé cette attente et ont permis d'identifier les apports potentiels de différentes technologies. Cependant, il a été difficile de généraliser ces résultats dans des environnements moins contrôlés et moins protégés. C'est pourquoi, à l'heure actuelle, « *une intégration efficace des technologies*

numériques à l'enseignement des mathématiques à grande échelle reste encore un problème non résolu » (Artigues, 2013, p. 10). Baron & Bruillard (2008) appuient ce constat sur la place et le rôle limités des TIC en insistant sur la « modestie de la prise en compte de l'informatique et d'internet dans les cursus scolaires. ».

1.3 Problèmes relevés et éléments de réponse

Parmi les différents obstacles ou défis que pose l'introduction des TICE, on trouve la question de leur légitimité. Dans le domaine des mathématiques, Artigues (1998) affirme que l'intégration du numérique dans les domaines scientifiques et culturels faits que le domaine éducatif n'a d'autre choix que de l'intégrer également, ne serait-ce que par souci de crédibilité. Néanmoins, cela ne suffit pas à convaincre le monde enseignant de modifier ses pratiques afin d'intégrer largement les TICE.

Les institutions encouragent également la banalisation de la technologie pour développer son utilisation en classes. Cependant, certains choix institutionnels nuisent à cette intégration en proposant des prescriptions génériques et peu consistantes sur les usages du numérique en classe (Lagrange, 2013). Or, les enseignants attendent des TICE qu'elles les aident à l'améliorer leur enseignement et à dépasser leurs difficultés actuelles. Artigues (1998) parle d'un cercle vicieux à ce sujet, car les « supporters » des TICE auraient tendance à exagérer leurs avantages et à minimiser les difficultés qu'elles occasionnent. Sur le court terme, cela favoriserait les pratiques innovantes ou les expérimentations avec de nouvelles technologies. À long terme cependant, ces difficultés, parfois majeures, ne sont pas anticipées, ce qui nuit au développement de stratégies d'enseignement adaptées et efficaces. Dès lors, l'introduction des TICE serait ancrée dans une phase transitoire qui favorise les enseignants « *pionniers* » des nouvelles technologies au lieu d'atteindre une phase de maturité qui impliquerait une population plus importante d'enseignant. Pour l'auteure, une solution pour dépasser cet obstacle passe par la formation des enseignants. Celle-ci doit prendre les TICE en compte et donner aux enseignants les outils didactiques pour adapter leurs pratiques d'enseignement.

En effet, Labbo, Leu, Kinzer & al (2003) ont montré que l'intégration de TICE dans les pratiques des enseignants leur posait des difficultés à la fois matérielles et conceptuelles. Le numérique induit en effet une complexification des processus et des dispositifs d'enseignement (Joab, Guin & Trouche, 2003). Pacurar (2015) a montré que cela induisait une dimension chronophage dans les phases de préparation du contenu. Cela pouvait alors nuire à l'appropriation par les enseignants de dispositifs tels que des TNI ou des manuels

numériques. En effet, d'après Lachance (1999) cité par Isabelle, Lapointe & Chiasson (2002), les enseignants hésitent à utiliser les TIC en classe malgré leur intérêt, parce qu'ils ne peuvent pas facilement s'approprier les nouveautés pédagogiques et technologiques tout en continuant à assurer l'ensemble de leurs fonctions. Cela rejoint les travaux d'autres chercheurs (Elliot, Livengood & McGlamery, 2012) quant à la nécessité d'une formation technique et pédagogique des enseignants vis-à-vis du numérique.

À cela s'ajoute le fait que les usages proposés par les concepteurs de TICE ne sont pas toujours adaptés aux pratiques d'enseignement. Il y a une interdépendance entre l'usage des TICE et l'activité des enseignants dans son ensemble, dont ils doivent rester maîtres. L'outil numérique seul n'apporte rien s'il n'est pas mis en œuvre dans le cadre d'un enseignement cohérent d'un point de vue didactique et pédagogique. De plus, la volonté institutionnelle de généralisation des TICE soutenait l'idée qu'il fallait « *innover* » par le biais d'une pédagogie active qui inciterait les élèves à expérimenter, à découvrir et à confronter leurs idées (Bétrancourt, 2007). Or, une grande partie des ressources développées ne favorisent pas ce type de pédagogie. Au contraire, certaines donnaient l'impression aux enseignants qu'elles essayaient de les remplacer, totalement ou en partie. Ils étaient alors supposés s'approprier des programmes d'apprentissages individualisés ou des systèmes « *clé en main* » (Lombard, 2007) qui leur laissaient peu de marges de manœuvre. Dès lors, les ressources entrent en rivalité avec l'activité de l'enseignant, malgré la volonté des concepteurs de l'assister, ce qui rend leur intégration difficile.

Ainsi, le rôle des enseignants dans cette intégration est sous-estimé et les ressources ne répondent alors pas toujours à leurs besoins (Joab & al., 2003). C'est pourquoi « *l'intégration des TIC doit être prise en main par les principaux acteurs de l'éducation, pour éviter que d'autres ne s'en occupent, avec des motivations sans doute bien différentes* » (Karsenti, Peraya & Viens, 2002, p. 466). Cela est d'autant plus vrai que l'acceptation des TICE par les enseignants passe par la mise en avant du développement professionnel qu'elles peuvent favoriser. Cela permettrait notamment de justifier le temps de préparation supplémentaire qu'il engendre (Bétrancourt, 2007).

De plus, Houdement & Kuzniak (1996), cités par Assude & Emprin (2013), ont montré qu'en mathématiques, les formations aux TICE par homologie, c.-à-d. qui mettent des enseignants-stagiaires à la place des élèves, sont majoritaires. Elles sont principalement articulées autour de la confrontation stagiaire/TICE et les explications du formateur, mais laissent peu de place aux échanges entre les stagiaires et ce dernier. D'après Assude & Emprin (2013) ce type de

formation présente un risque de confusion pour les stagiaires entre leur appropriation de la technologie et celle des élèves et serait une source du manque d'efficacité des formations. En cela, la formation n'est pas une réponse en soi. Ces recherches incitent à penser la formation comme intégrant les besoins des enseignants relativement à l'introduction des TICE dans leurs pratiques professionnelles.

1.4 Importance de la formation des enseignants au numérique

Cette partie a décrit plusieurs facteurs a priori favorables à l'intégration du numérique dans les établissements scolaires :

- Le développement des ressources numériques pour l'enseignement et l'apprentissage représente une priorité forte pour les instances gouvernementales, comme le montrent les contenus des programmes scolaires ;
- Des enseignants reconnaissent l'intérêt du numérique pour certaines tâches ;
- La diversité des TICE semble présenter un avantage pour s'adapter aux différentes disciplines enseignées et à la variété des pratiques d'enseignement et d'apprentissage.

L'intégration de certains de ces dispositifs, caractérisée par « *une utilisation fluide, continue, des technologies informatiques pour les activités de la classe pour lesquelles elles sont adaptées* » (Bétrancourt, 2007, p. 3), doivent donner lieu à une transformation des pratiques d'enseignement et d'apprentissages.

La formation des enseignants à l'utilisation des TICE représente un levier important pour cela. En effet, le manque de connaissances concernant la technologie et son intégration dans l'enseignement apparaît sous-jacent à d'autres difficultés, telles que la dimension chronophage de la préparation des cours, et à l'intégration effective de la technologie dans son déroulement.

Cependant, plusieurs auteurs (Artigues, 2013 ; Bétrancourt, 2007 ; Joab & al., 2003 ; Pettenati, Giuli & Abou Khaled, 2001) constatent un manque d'adaptation des formations actuelles qui visent l'appropriation de dispositifs « *clé en main* ». À l'inverse, elles devraient plutôt porter sur leur intégration dans les pratiques des enseignants ou sur leur mise en œuvre en classe, en formation initiale ou continue (Péraya, Lombard, Bétrancourt, 2008).

L'acquisition de connaissances sur la technologie et sur ses usages pour des activités d'enseignement et d'apprentissage permettrait à un enseignant de transformer son activité tout en garder la main dessus et d'être conscient des plus-values potentielles de l'utilisation de

TICE. En effet, les enseignants mobilisent et construisent dans leurs pratiques professionnelles des connaissances sur les contenus d'enseignement disciplinaire, sur les méthodes didactiques pour transmettre ou favoriser l'acquisition de ces contenus ou encore sur les méthodes pédagogiques de gestion. Néanmoins, pour favoriser l'intégration des TICE dans l'enseignement en général, des connaissances sur l'articulation de la technologie avec les pratiques d'enseignement sont indispensables à construire. La partie suivante présente un modèle de connaissances des enseignants prenant en compte les différentes dimensions de son activité, y compris des connaissances liées à la technologie.

2 Le modèle des TPACK, un modèle de connaissances pour la formation des enseignants

Cette partie décrit deux modèles de connaissances des enseignants : le modèle Pedagogical Content Knowledge (PCK) de Shulman (1986) et un prolongement de ce modèle défini par Koehler & Mishra (2005), le modèle Technological Pedagogical And Content Knowledge (TPACK). Il est dédié aux activités d'enseignement instrumentées par la technologie. Des travaux basés sur ce modèle afin d'étudier le développement des différents types de connaissances sont ensuite décrits.

2.1 Distinction préliminaire entre connaissances et savoirs

En didactique, la distinction entre savoirs et connaissances est importante. Nous reprenons les définitions de Brousseau & Centeno (1991) ou par la suite de Jonnaert, Barrette, Boufrahi & al. (2004) :

- Les savoirs sont des énoncés décontextualisés de contenus à enseigner décrits dans des matériels didactiques tels que les programmes d'études ou les manuels scolaires. Ils sont codifiés et déterminés socialement et ont fait l'objet d'une transposition didactique, processus par lequel un savoir savant, c'est-à-dire celui des spécialistes du domaine, devient un savoir à enseigner accessible aux élèves en tant qu'objet d'apprentissage (Chevallard, 1985).
- Les connaissances « font partie du patrimoine cognitif d'une personne. Les connaissances ne sont plus seulement des constructions sociales comme le sont les savoirs, la personne

les a construites à travers ses expériences, elles lui sont donc propres. Elles ne sont pas acquises une fois pour toutes, elles sont temporairement viables, tant et aussi longtemps que la personne peut les utiliser et les adapter à différentes situations. » (Jonnaert & al., 2004, p. 681).

Cette distinction met l'accent sur les dimensions subjective et évolutive des connaissances résultant de processus d'apprentissage, contrairement aux savoirs. Concernant les enseignants, les travaux présentés dans les parties suivantes présentent des modèles permettant de distinguer leurs connaissances.

2.2 Le modèle PCK de Schulman

Afin d'étudier les connaissances professionnelles des enseignants, nous reprenons la classification proposée par Schulman (1987) qui distingue deux grandes catégories, chacune composée de sous-catégories :

- Les connaissances relevant des contenus disciplinaires à enseigner intègrent :
  1. Des savoirs tels qu'ils ont été définis dans le paragraphe précédent ;
  2. Des connaissances sur les programmes scolaires ou les prescriptions institutionnelles sur les concepts à enseigner et les compétences à faire acquérir ;
  3. Des connaissances pédagogiques liées au contenu disciplinaire, appelées *Pedagogical Content Knowledge,* qui concernent les caractéristiques propres à l'enseignement et à l'apprentissage d'une discipline spécifique.
- Les connaissances qui ne sont pas rattachées à une discipline particulière sont composées :
  4. Des connaissances pédagogiques générales concernant la gestion de la classe au niveau organisationnel, temporel ou matériel ;
  5. Des connaissances sur les élèves et leurs caractéristiques ;
  6. Des connaissances sur le contexte global, de la classe à l'établissement ;
  7. Des connaissances sur les buts de l'éducation, ses valeurs et ses fondements.

Les types de connaissances listées sont, pour la plupart, explicites. Néanmoins, les connaissances pédagogiques liées aux contenus disciplinaires, ou *Pedagogical Content Knowledge* méritent d'être détaillés. Elles ont été définies pour combler un manque, constaté par Schulman (1986), dans les paradigmes existants concernant les connaissances

des enseignants qui vont au-delà des contenus disciplinaires seuls en y intégrant la dimension de l'enseignement telles que les connaissances sur :

- La façon de représenter et de formuler ces contenus de façon à les rendre compréhensibles par d'autres ;
- Ce qui rend une notion ou un sujet particulier facile, ou à l'inverse, difficile à comprendre en incluant les conceptions préexistantes des élèves ;
- Les stratégies les mieux adaptées pour favoriser leur apprentissage de contenus donnés.

2.3 Le modèle TPACK de Koelher & Mishra

Dans le prolongement des travaux de Schulman, Koehler & Mishra (2005) ont introduit le modèle TPACK, pour *Technological Pedagogical And Content Knowledge*. Il complète le modèle PCK en y ajoutant les connaissances des enseignants sur les technologies utilisées en classes et sur leur articulation avec les connaissances liées au contenu et celles plus transverses, liées à la pédagogie notamment. Mishra & Koehler (2006) proposent trois grandes catégories de connaissances qui se recouvrent et s'articulent (notre traduction) :

- CK (*Content Knowledge*) : les connaissances liées au contenu disciplinaire à enseigner, c.-à-d. les concepts, les théories, les cadres explicatifs, etc. (soit les connaissances numérotées 1 & 2 du paragraphe précédent) ;
- PK (*Pedagogical Knowledge*) : les connaissances générales sur les processus et les pratiques d'enseignement et d'apprentissage, la gestion de la classe, le développement et l'implémentation de leçons, l'évaluation des élèves (4, 5, 6 et 7) ;
- TK (*Technological Knowledge*) : les connaissances sur les technologies habituelles (papier, crayon, tableau, etc.) et les nouvelles technologies ainsi que les modalités qu'elles proposent pour représenter l'information ;
- PCK (*Pedagogical Content Knowledge*) : les connaissances sur les représentations et la formulation des concepts, sur ce qui rend une notion plus ou moins difficile à apprendre, sur les techniques d'enseignement les plus appropriées pour chacune, sur les connaissances antérieures des élèves et les conceptions préexistantes, etc. (3) ;
- TCK (*Technological Content Knowledge*) : les connaissances sur les relations entre le contenu et la technologie, en quoi le contenu d'une discipline est transformé par l'utilisation d'une technologie, comment elle le contraint et les nouveaux types de représentations qu'elle propose ou la flexibilité pour passer de l'une à l'autre ;

- TPK (*Technological Pedagogical Knowledge*) : les connaissances sur les différents outils technologiques existantes pour réaliser une tâche donnée et sur le type de stratégie pédagogique à employer pour profiter au mieux d'une technologie donnée ;
- TPACK (*Technological Pedagogical And Content Knowledge*) : les connaissances sur les représentations et la formulation de concepts en utilisant la technologie, sur les techniques pédagogiques qui exploitent au mieux la technologie pour enseigner un contenu donné, sur ce qui rend un concept plus ou moins difficile à apprendre et comment la technologie peut aider et sur comment la technologie peut être utilisée pour construire sur les connaissances existantes des élèves et pour les développer ou les renforcer.

Le modèle des TPACK, synthétisé dans la Figure 3, suggère que les enseignants ont besoin d'avoir des connaissances dans chacune d'elle (TK, PK & CK), mais qu'ils doivent également avoir des connaissances qui articulent technologie, pédagogie et contenu (TPACK) qui constituent un noyau pour mener à bien leur activité d'enseignement avec une technologie donnée. Ainsi, les seules connaissances sur ce qu'un artefact « permet de faire » ne suffisent pas pour qu'il soit intégré dans un enseignement. Elles doivent être combinées avec les connaissances sur les stratégies et les contenus pour devenir des connaissances sur ce que l'artefact « permet de faire pour l'enseignant » (Koehler, Mishra & Yahya, 2007). Ainsi, le développement des TPACK serait une condition à une intégration réussie de la technologie dans l'enseignement.

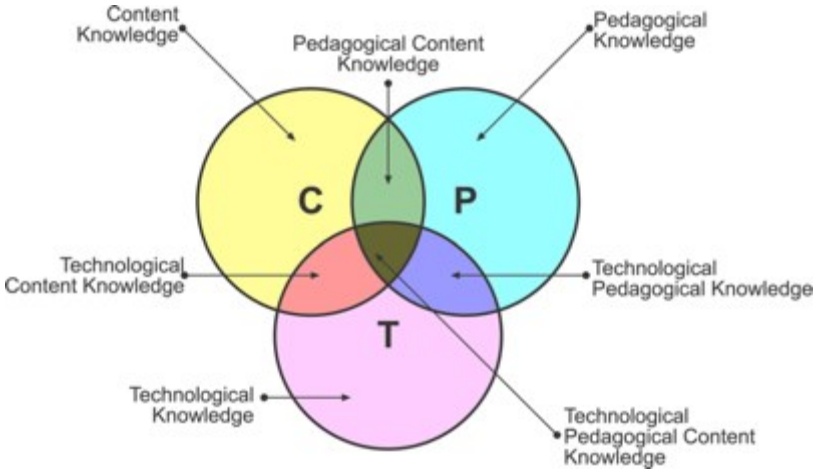


Figure 3. Le modèle *Technological Pedagogical Content Knowledge* (Koehler, Mishra & Yahya, 2007, p. 3)

À titre d'illustration de ces développements des TPACK, McKenney, Boschman, Pieters & Voogt (2016) ont montré que dans une tâche de conception pour l'enseignement de l'écriture, la mobilisation des PCK et des TPACK est principalement liée à des considérations pratiques. Celles-ci renvoient à des réflexions sur la faisabilité, la complexité ou la pertinence de nouvelles idées lorsque les enseignants appréhendent leur implémentation réelle. Les CK font référence aux objectifs des enseignants, les PCK sont relatives aux tâches d'apprentissages, p. ex. des tâches d'écriture. Les TCK renvoient à la présentation des travaux d'élèves à l'écran par l'enseignant. Les TPACK correspondent aux échanges en lien avec la façon dont les élèves sont amenés à produire des documents écrits et comment les enseignants utiliseraient ultérieurement ces productions. Cet exemple visait à montrer concrètement comment les différents types de connaissances décrites dans le modèle des TPACK peuvent être mobilisés par des enseignants pour la préparation de leur cours. La partie suivante décrit comment ces connaissances peuvent s'articuler en situation de formation à l'enseignement afin de construire des connaissances de type TPACK.

2.4 Développement des TPACK

Avec l'importance donnée aux connaissances de type TPACK, en tant qu'articulation de connaissances liées à la technologie, aux contenus et à la pédagogie, la question de leur développement apparaît primordiale. D'après Koehler, Mishra & Kereluik (2014), il n'y a pas à l'heure actuelle de séquence de développement « *idéale »,* bien que ce développement constitue un objectif des dispositifs de formation des enseignants, qu'ils soient débutants ou confirmés. Ils ont identifié trois grandes approches dans la littérature pour décrire le développement des TPACK par rapport aux autres catégories de connaissances du modèle : des PCK vers les TPACK (i), des TPK vers les TPACK (ii) ou PCK et TPACK simultanément (iii).

Le développement des TPACK à partir de PCK (i) concerne principalement des enseignants confirmés, car la technologie est introduite comme un moyen d'améliorer l'enseignement à partir de leur expérience. Ils construisent dans un premier temps des PCK dans des formations et au fil de leur expérience sans technologie puis cette dernière est introduite et donne lieu au développement de TPACK. Un exemple de cette approche correspond aux enseignements basés sur des *types d'activité* (Harris & Hofer, 2009). Chaque *type d'activité* « *capture ce qui est le plus essentiel à propos de la structure d'un type d'action d'apprentissage donné dans la mesure où il fait référence à ce que les élèves font quand ils sont engagés dans une activité*

d'apprentissage donnée » (Harris & Hofer, 2009, p.3, notre traduction). Un type d'activité peut par exemple correspondre à une tâche de discussion en groupe, l'écriture d'un rapport ou la création d'une frise chronologique. Les types d'activités interviennent dans la planification de l'apprentissage des élèves résultant du choix des objectifs d'apprentissages. Puis, à partir des décisions pédagogiques sur la nature de l'expérience d'apprentissage, l'enseignant choisit et articule différents *types d'activités*, des stratégies d'évaluation de l'apprentissage et enfin les outils et les ressources qui seront utilisées par les élèves. Une limite potentielle de cette approche réside dans les conceptions ou les croyances préexistantes des enseignants. Elles peuvent en effet limiter leur enclin à tester de nouvelles stratégies rendues possibles par la technologie. Ceci constitue une dimension importante à prendre en compte dans la composition du groupe de travail avec des utilisateurs pionniers. Elle sera plus particulièrement prise en compte à travers l'identification des besoins des utilisateurs (confère chapitre 6)

Avec de futurs enseignants, les formateurs peuvent chercher à construire des TPACK sur la base des TPK (ii) lorsque lesdits enseignants n'ont pas encore été formés à des méthodes d'enseignement spécifiques à un contenu donné. Des méthodes d'enseignement transverses peuvent alors être décrites en intégrant la technologie sans qu'elles soient liées à un contenu particulier. Plus tard, en formation ou dans la pratique, les enseignants peuvent alors intégrer ces TK et ces TPK avec des PCK plus récents pour développer des TPACK. L'approche appelée *Technology Mapping (*Angeli & Valanides, 2005) reprend cette séquence sous une autre forme. Toujours chez de futurs enseignants, elle consiste à faire correspondre les propriétés de différentes technologies éducatives avec leurs apports potentiels pour assister des méthodes pédagogiques et/ou pour transformer les représentations de contenus donnés.

Le développement simultané des PCK et des TPACK est également une approche principalement dédiée aux enseignants en formation initiale. Dans cette approche, la technologie est systématiquement introduite dans les formations. Par exemple, les cours sur les méthodes spécifiques à certains contenus visent à apprendre aux futurs enseignants comment utiliser la technologie pour enseigner des contenus particuliers au lieu que cette dernière ne soit enseignée de manière isolée. Par conséquent, un risque de cette approche concerne la charge de travail requise pour construire des connaissances simultanément sur le contenu, la pédagogie et la technologie. Mishra & Koehler (2005) décrivent un exemple de cette approche nommé *Learning Technology by Design*. De futurs enseignants y sont confrontés à des problèmes de conception collaborative concernant des tâches d'enseignement

en intégrant des technologies. Au lieu de suivre des cours sur ces dernières, ils construisent, au cours de la conception, des connaissances dans les différentes catégories du modèle TPACK qui tendent vers leur intégration sous la forme de PCK, TPK, TCK et TPACK. Le concept de *Learning Technology by Design* présente également un intérêt puisqu'il renvoie à la dimension formative des activités de conception de ressources pédagogiques. Cependant, la séquence de développement des TPACK proposées par cette approche est peu pertinente dans notre cas. En effet, la construction parallèle de TK, PK et CK suivie de leur intégration dans les autres types de connaissances est peu applicable chez des enseignants confirmés, tels que ceux que nous mobiliserons dans la démarche de conception.

2.5 Intérêt du modèle des TPACK en conception

Le modèle des TPACK (Mishra & Koehler, 2006) pour représenter les connaissances des enseignants présente l'intérêt d'articuler les connaissances sur la technologie (TK), sur le contenu à enseigner (CK) et sur les méthodes à disposition de l'enseignant (PK). Il montre qu'elles peuvent être intégrées, jusqu'à combiner les trois types (TPACK). L'acquisition de connaissances de ce type constitue alors un objectif de formation des enseignants. Ce modèle a été appliqué à de nombreuses situations dans la littérature et s'appuie sur les travaux largement reconnus de Schulman (1986, 1987) sur les PCK.

Le modèle des TPACK peut nous aider à caractériser les connaissances mobilisées en conception ainsi que l'intégration des différents types de connaissances que les processus de conception participative des technologies peuvent promouvoir. Nous avons également vu qu'il pouvait être utilisé en contexte de conception de ressources pédagogiques avec des enseignants (p. ex. McKenney, Boschman, Pieters & Voogt, 2016 ; Mishra & Koehler, 2005), ce qui présente un intérêt dans notre démarche de conception de TICE.

Afin de mieux décrire le développement des connaissances chez des enseignants en conception, il apparaît nécessaire de s'intéresser aux situations de conception qu'ils rencontrent habituellement. La partie suivante illustre ces situations, en lien avec les apprentissages qu'ils peuvent induire chez des enseignants en situation de conception.

3 La conception participative de l'enseignement : une source d'apprentissage

Durand (1999) attire l'attention sur le fait que « pour qui s'intéresse à l'analyse du travail, l'enseignement s'apparente à celui de l'ergonome. En effet, une part de cette activité consiste à définir, organiser, réguler un travail : celui des élèves. Les enseignants sont des pourvoyeurs de tâches et les modélisations de l'apprentissage scolaire et de l'instruction, mettent l'accent sur cette notion de travail, opérationnalisée en termes d'engagement dans une tâche » (p. 124). En précisant ce point de vue, Saujat & Serres (2015) notent que le professeur se trouve devant une difficulté comparable à celle de l'ergonome de conception qui tente d'évaluer et d'anticiper « *l'espace des formes possibles de l'activité future* » (Daniellou, 2004), celle de ses élèves, mais aussi la sienne propre en réponse à la leur.

Ce travail de conception en étant mis à l'épreuve de l'activité conjointe en classe constitue une source d'apprentissage et de construction de connaissance en classe. Nous l'avons formulé auparavant : le PCK constitue un bon modèle permettant de rendre compte des réorganisations, donc du développement que suggèrent de tels apprentissages.

Allons plus loin, la participation à un groupe de conception participative d'une technologie, si elle implique une redéfinition des scénarios pédagogiques habituellement conçus et mobilisés par les enseignants, constitue sans nul doute une source d'apprentissage et de développement. Encore faut-il s'attarder et discuter la nature de tels apprentissages.

Sfard (1998) distingue la nature des apprentissages professionnels au regard des métaphores communément mobilisés dans les théories de l'apprentissage : apprentissage par acquisition et apprentissage par participation. Cette notion de métaphore correspond à des *transplantations conceptuelles* permettant d'expliquer les processus qui transforment des connaissances existantes en connaissances nouvelles. Sfard en définit deux types :

- La métaphore de l'acquisition correspond à une vision de l'apprentissage comme *développement de concepts* et *d'acquisition de connaissances* ;
- La métaphore de la participation renvoie à la participation d'un apprenant à des activités liées notamment au discours et à la communication. Elle met en avant la place de

l'apprenant dans un contexte situé socialement et culturellement auquel il prend part, et duquel il fait partie.

Le tableau suivant fait une synthèse des caractéristiques de chaque métaphore.

	METAPHORE DE L'ACQUISITION	**METAPHORE DE LA PARTICIPATION**
LE BUT DE L'APPRENTISSAGE	Enrichissement individuel	Construction d'une communauté
L'ACTIVITÉ D'APPRENTISSAGE	Acquisition de quelque chose	Fait de devenir un participant
L'APPRENANT	Réceptacle, constructeur	Participant périphérique, apprenti
L'ENSEIGNANT	Médiateur, facilitateur, fournisseur	Participant expert, garant de la pratique ou du discours
LES CONNAISSANCES ET LES CONCEPTS	Propriété, possession (publique ou individuelle)	Aspect de la pratique, du discours ou de l'activité
LE FAIT DE SAVOIR	Avoir, posséder	Faire partie d'un groupe, participer, communiquer

Tableau 1. Comparaison des deux métaphores de l'apprentissage adapté de Sfard (1998)

Dans la suite de ce document, nous nous intéresserons principalement aux formes d'apprentissage relatives à la seconde métaphore dans des situations de conception par des enseignants de leurs ressources. Ces situations correspondent par exemple à la préparation du cours par un enseignant ou la conception de ressources pédagogiques pour l'enseignement avec ou sans technologie. Les travaux présentés dans cette partie abordent les formes d'apprentissage possibles pour des enseignants dans de telles situations.

3.1 La préparation du cours et des scénarios pédagogiques

La préparation d'un cours peut être vue comme une activité dans laquelle des enseignants « *mettent en jeu différentes connaissances et les articulent pour choisir des activités, des exercices, fractionner la séance, choisir une forme de travail en classe, anticiper le temps, les réactions et les difficultés des élèves, gérer les traces écrites des élèves… »* (Bécu-Robinault, 2007, p. 165). D'après l'auteure, les connaissances mises en œuvre lors de la préparation du cours peuvent avoir trois origines : construites à partir d'un texte institutionnel, issue d'un échange sur les pratiques ou résultat de l'expérience acquise par l'enseignant. De plus, dans le cas de la préparation du cours par des enseignants de sciences physiques, l'auteure a relevé que :

- les enseignants déclarent prendre en compte les impératifs du programme scolaire ;

- selon les enseignants, l'importance donnée à ces impératifs peut cependant varier ;
- la maîtrise des contraintes matérielles est importante, en particulier pour les expériences à réaliser en classe ;
- les connaissances antérieures des élèves et leur compréhension des notions abordées dans le cours sont prises en compte lors de la préparation du cours ;
- une planification souple du cours permet une meilleure adaptation aux élèves et au terrain.

Le résultat de la préparation d'un cours peut être mis au propre dans un document rédigé pour guider l'enseignant pendant son cours sous la forme de scénarios pédagogiques. Ces derniers s'appuient sur des prescriptions, c.-à-d. ce que l'institution scolaire définit et communique aux enseignants pour les aider à concevoir, organiser et réaliser leur travail (Goigoux, 2007). Plus précisément, lors de la conception de scénarios pédagogiques, un enseignant est amené à se poser les questions suivantes (Musial, Pradère & Tricot, 2011, p. 16) :

- Comment faire acquérir les connaissances ?
- Comment présenter les objectifs ?
- Quelles sont les tâches d'apprentissage ?
- Quelles sont les progressions parmi les contenus ?
- Comment réguler l'activité de l'apprenant ?
- Comment évaluer les connaissances ?

À partir des travaux de Pernin & Lejeune (2004), nous adopterons la définition suivante : un scénario pédagogique constitue la description a priori du déroulement d'une situation d'apprentissage visant l'appropriation d'un ensemble précis de connaissances, en précisant les rôles des élèves et de l'enseignant, leurs tâches ainsi que les ressources nécessaire à la réalisation de ces tâches.

3.2 Les activités de conception collective de l'enseignement

Walker (1971) a proposé une classification des types d'échanges en conception d'enseignement, entre enseignants, appelée *SACD* pour *Structural Analysis of Curriculum Deliberation*. Chaque épisode, défini par un ensemble de contributions cohérentes entre elles, correspond à une des quatre catégories suivantes :

- Un *brainstorming* correspond à une phase de génération d'idée dans laquelle il y a beaucoup d'interactions entre les enseignants et les décisions sont prises intuitivement ;
- un *problème* renvoie à la définition dudit problème, son cadrage et l'élaboration collective et argumentée d'une solution ;
- une *explication* a lieu lorsqu'une personne présente et explique une notion ou lorsqu'elle éclaire le groupe sur un sujet dont elle est experte ;
- le *REX* fait référence au recours par un enseignant à un exemple concret de situation d'enseignement réelle.

Dans chaque épisode codé, Walker (1971) propose de coder les contributions individuelles selon quatre catégories :

- une *difficulté* est définie par l'énoncé d'un aspect non satisfaisant de la situation, d'un problème, qui doit être discuté par le groupe ;
- une *proposition* correspond à l'énoncé d'une solution pour la difficulté ;
- un *jugement* est une évaluation d'une proposition faite ;
- un *exemple* illustre un propos.

Cette grille d'analyse a notamment été utilisée pour coder les verbalisations en conception entre enseignants de maternelle par Boshman, McKenney & Voogt (2014). Ils ont montré par exemple que dans les échanges, les épisodes de type *brainstorming* étaient prédominants et que les *problèmes* n'étaient pas abordés en profondeur. Ces derniers étaient souvent résolus par *brainstorming*, sans argumentation poussée, et principalement par rapport à des questions pédagogiques, telles que la motivation des élèves. Dans leur étude, les auteurs ont insisté sur le fait que les enseignants auraient besoin de connaissances sur la technologie et sur comment elle pourrait être articulée avec les contenus disciplinaires à enseigner.

3.3 Les apprentissages en conception de TICE

3.3.1 L'approche Design-Based Research

Les méthodes de type *Design-Based Research (DBR)* visent à faire travailler des chercheurs avec des enseignants et des élèves afin de concevoir, d'implémenter et d'évaluer des dispositifs d'enseignement et d'apprentissage innovants en situation de classe réelle (Brown, 1992 ; Collins, 1990). Plus récemment, Sandoval & Bell (2004) ont distingué deux objectifs de ce type d'approche : développer des environnements d'apprentissage efficaces et utiliser

ces environnements comme des « laboratoires naturels » pour étudier les activités d'enseignement et d'apprentissage. Ces approches sont itératives et concernent généralement un petit nombre de classes afin d'étudier les usages de ces dispositifs (Fishman, Marx, Blumenfeld & al., 2004). Elles peuvent être traduites par *Recherche orientée par la conception* et permettent notamment de former les praticiens impliqués au travers de partages de praxéologies, qui se composent de leurs savoir-faire et de leurs connaissances (Chevallard, 1997 ; Sanchez & Monod-Ansaldi, 2015).

En situation de formation, Aldon, Arzarello, Cusi & al. (2013) parlent de *praxéologie méta-didactique* correspondant aux réflexions pratiques et théoriques qui s'y développent. Sanchez & Monod-Ansaldi (2015) soutiennent que ce concept peut être étendu aux situations de conception collaborative de type *DBR* dans la mesure où celles-ci aboutissent à la mise en place d'une praxéologie partagée entre chercheurs et praticiens. Les auteurs distinguent ces deux situations d'après leurs objectifs : la formation « *vise au transfert de connaissances établies et au développement professionnel des participants* » alors que la recherche (*DBR*) vise « *la construction de savoirs nouveaux par la mise à l'épreuve de modèles et d'hypothèses* » (Sanchez & Monod-Ansaldi, 2015, p. 89). Néanmoins, celle-ci pourrait également conduire au développement professionnel des enseignants impliqués. En effet, le partage de praxéologie méta-didactique résulterait de l'évolution conjointe des savoir-faire, c.-à-d. les tâches d'apprentissage et les techniques d'enseignement, et des justifications de ces savoir-faire.

L'approche défendue par le *Design-Based Research*, bien qu'elle ne porte pas exclusivement sur les TICE présente plusieurs caractéristiques intéressantes pour cadrer notre démarche de conception. Elle met en effet en avant le rôle potentiellement formateur des activités de conception de dispositifs d'enseignement et d'apprentissage, par le biais des praxéologies méta-didactiques.

3.3.2 L'approche Learning Technology by Design

En reprenant le modèle des TPACK, il est peu pertinent, d'après Koehler & Mishra (2005), de former les enseignants aux TK, PK ou CK séparément étant donné les articulations entre ces types de connaissances. Le développement des TPACK passe par le développement des ressources pédagogiques cohérentes intégrant la technologie. Les auteurs nomment ce type de démarche de conception « *Learning Technology by Design* ». Il s'agit d'une approche constructiviste dans laquelle le caractère mal-défini d'un problème, reflétant la complexité de

situation d'enseignement, permet à des enseignants concepteurs de construire des savoirs nouveaux. Ces apprentissages concernent notamment des savoirs et des savoir-faire liés à la technologie, au niveau matériel et logiciel, qui évolue au fil de la conception selon les besoins des apprenants, ici les enseignants concepteurs. Cependant, les activités de conception à but éducatif ne donnent généralement pas lieu à des sous-tâches liées à un domaine (T, P ou C) de manière isolée. Elles font plus généralement appel à plusieurs voire toutes ces dimensions. Ainsi, les participants n'apprennent pas tant le fonctionnement de la technologie en général, mais plutôt ce qu'elle pourrait apporter dans leur discipline ou au regard de leurs méthodes d'enseignement.

Dans leur étude, Koehler, Mishra & Yahya (2007) ont montré qu'il y avait une évolution des connaissances chez les enseignants en conception participative : dans un premier temps, les échanges portaient principalement sur les dimensions T, P et C de façon indépendante, mais par la suite, ils les ont davantage intégrés, développant ainsi des TPACK. McKenney, Boschman, Pieters & al. (2016) ont par exemple étudié les échanges entre enseignants lors de la conception d'un dispositif numérique destiné à l'apprentissage de l'écriture chez de jeunes enfants. En termes de connaissances mobilisées, ils ont montré que :

- les CK étaient mobilisées pour discuter d'objectifs de ces activités d'apprentissage ;
- les PCK correspondaient aux pratiques d'enseignement actuelles ou futures en classe aux activités impliquant des tâches d'écriture ;
- les TCK renvoyaient à l'affichage sur un écran des productions écrites des enfants ;
- les TPACK ont émergé concernant les modalités de production de traces écrites par les élèves et sur l'exploitation de ces écrits avec des outils informatiques.

3.4 Intérêt de cette dimension formative pour le travail de thèse

Des approches de types *Design-Based Research* ou *Learning Technology by Design* peuvent être source d'apprentissages pour les enseignants impliqués, afin d'intégrer le numérique et de transformer leurs pratiques. La première approche vise à étudier l'apprentissage et l'enseignement en s'appuyant sur les activités déployées en conception. Dans la seconde, les activités déployées en conception sont vues comme des outils de développement des compétences des enseignants. Or ces deux objectifs nous intéressent pour favoriser le développement des pratiques enseignantes par l'innovation et l'intégration des produits de notre activité de conception. D'un point de vue pragmatique, celle-ci devrait s'inspirer de

l'idée de tester les résultats de la conception en situations réelles avec des élèves afin d'effectuer des itérations sur les artefacts à concevoir. D'un point de vue épistémique, l'étude des connaissances mobilisées en conception permettrait d'étudier le développement des connaissances des enseignants impliqués en conception. En cela, la littérature en ergonomie sur les activités de conception participatives peut apporter des éléments de discussion supplémentaire.

4 Les apprentissages en conception

Cette partie vise à prendre du recul par rapport aux parties précédentes en élargissant la focale à aux activités de conception dans leur ensemble. L'objectif principal est d'articuler les travaux scientifiques en ergonomie d'une part, et en sciences de l'éducation ou en didactique d'autre part. Cela permettrait d'appréhender l'impact potentiel des activités de conception sur la transformation de l'activité en classe avec un angle différent, mais complémentaire selon nous.

Les activités de conception sont d'abord présentées d'un point de vue cognitiviste en tant qu'activités de construction de *représentations* chez les concepteurs. Les principales caractéristiques des approches de *conception participative* sont ensuite décrites. Enfin, travaux en ergonomie de conception sur les *formes d'apprentissages* en conception sont discutées et articulées avec les résultats mentionnés dans les parties précédentes.

4.1 Approche cognitiviste des activités de conception

4.1.1 La conception comme une activité de résolution de problème

Historiquement, la conception a été considérée, d'un point de vue cognitiviste, comme une activité de *résolution de problèmes mal définis* (Simon, 1973). Par la suite, de nombreuses études ont permis d'enrichir cette définition (p. ex. Darses, Détienne & Visser, 2004 ; Darses & Falzon, 1996 ; Goel & Pirolli, 1989). À partir des travaux existants en ergonomie cognitive à la fin des années 90, Visser (2009) propose une liste de 11 caractéristiques des activités de conception :

- C'est une activité de résolution de problèmes « ordinaire » qui ne nécessite pas d'introduire de composants qualitativement nouveaux ;

- Les problèmes de conception sont des problèmes « mal définis », car l'état initial et l'état final sont flous et il n'y a pas de démarche préexistante pour arriver de l'un à l'autre ;
- C'est une activité cognitive plutôt qu'un statut professionnel, car elle n'est pas réservée à des ingénieurs ou à des personnes dont la profession serait « concepteur » ;
- Les concepteurs sont à la recherche d'un compromis qui consiste à « se contenter de ce qui est suffisamment bon » (*satisficing*) ;
- Les problèmes de conception sont des problèmes complexes qu'il est difficile de décomposer en sous-problèmes indépendants ;
- Les concepteurs génèrent des solutions précoces qui représentent un noyau de solutions auxquelles les concepteurs restent fidèles dans l'élaboration de leur solution globale ;
- Il y a plusieurs solutions satisfaisantes, ou acceptables, plutôt qu'une seule solution correcte, liées à la recherche de compromis ;
- C'est une activité opportuniste dans laquelle les concepteurs procèdent de façon non systématique, multidirectionnelle et à différents niveaux, abstraits et concrets ;
- Il y a évaluation de solution en l'absence de critères préexistants qui résultent de négociations entre les concepteurs selon leur expertise et leur représentation du projet ;
- Il y a réutilisation de connaissances, notamment grâce aux raisonnements par analogie ;
- Il y a deux étapes dans la résolution d'un problème mal structuré : la structuration du problème et sa résolution, également appelée « construction de la représentation du problème », et la « génération de solution », qui, en pratique, a lieu en parallèle.

À l'exception des deux derniers items de cette liste, les caractéristiques proposées informent peu sur les apprentissages qui peuvent avoir lieu en conception. Cependant, la notion de représentation peut permettre d'opérationnaliser le modèle des TPACK (Koehler & Mishra, op.cit.) afin étudier par exemple la mobilisation, l'acquisition ou la réorganisation des connaissances des concepteurs.

4.1.2 La conception comme une activité de construction de représentations

Suite à une réflexion sur la perspective des activités de conception comme activités de résolution de problème, Visser (2009) propose de passer de cette perspective à celle de la conception comme une activité de *construction de représentations* de l'artefact à concevoir.

Les travaux sur les représentations en conception distinguent deux types de représentation : les représentations externes et les représentations internes. Les représentations externes concernent par exemple les croquis, les maquettes ou plus généralement les *objets intermédiaires* de la conception (Mer, Jeantet & Tichkiewitch, 1995). Les représentations internes renvoient aux buts, aux stratégies, aux procédures, aux connaissances du domaine, aux contraintes et aux critères mobilisés au fil de la conception (Darses, 2009). Les représentations de ce type deviennent de plus en plus détaillées, précises et concrètes jusqu'à pouvoir spécifier complètement et explicitement un artefact.

Visser (2009) identifie trois grandes catégories d'activités de construction de représentations : la *génération*, la *transformation* et *l'évaluation*. Elles intègrent elles-mêmes d'autres activités, opérations ou processus tels que l'analyse, l'exploration, la formulation d'hypothèse ou le raisonnement analogiques (Visser, 1992).

La *génération* correspond à la construction de représentations basées principalement sur les connaissances ou la mémoire à long terme du concepteur, tout en prenant en compte les contraintes externes initiales du projet.

La *transformation* se distingue de la génération en ce qu'elle s'appuie sur l'état d'avancement du projet de conception pour dupliquer, ajouter, détailler, concrétiser, codifier ou révolutionner une représentation existante.

L'évaluation se fait par rapport à une référence prescrite, construite ou déduite selon trois types de stratégies : l'évaluation analytique (identification des inconvénients et des avantages), l'évaluation comparative (termes à termes) ou l'évaluation analogique (transfert à la représentation courante d'un jugement antérieur dans un cas similaire) (Bonnardel, 2006, p. 127).

L'intérêt de cette approche en termes de représentations est de fournir un cadre pour l'analyse des activités de conception du point de vue des connaissances des concepteurs, notamment avec le modèle des TPACK chez des enseignants concepteurs. En effet, les activités de génération de représentation s'appuient, par définition, sur les connaissances et la mémoire à long terme. Les évaluations de représentation peuvent également s'appuyer sur des connaissances, en particulier lorsqu'il y a transfert d'une représentation courante à un cas antérieur ou lorsqu'elle est confrontée à une référence prescrite. Les activités de transformation sont quant à elles plus diversifiées. Intuitivement, il semble logique que les

transformations de représentations s'appuient également sur les connaissances des concepteurs, qu'elles soient antérieures à l'activité de conception ou relatives à l'état de l'artefact en cours d'élaboration. Néanmoins, il pourrait être fructueux d'observer comment celles-ci sont effectivement mobilisées et si elles peuvent rendre compte d'apprentissage chez les concepteurs.

4.2 La conception participative

4.2.1 Présentation générale

Les processus de conception participative se sont développés principalement en Suède dans les années 70 (Caelen, 2004) et plus généralement dans les pays scandinaves (Bjerknes & Bratteteig, 1995). Ils mettent l'accent sur l'intégration d'utilisateurs potentiels afin d'en faire des co-concepteurs qui prennent part aux différentes phases de développement et qui participent aux prises de décisions. Ces derniers possèdent en effet des compétences, une expérience et des savoir-faire qui peuvent être valorisés afin d'enrichir une démarche de conception (Prost, 2008). Pour Bourmaud (2006), la participation d'acteurs de la situation de travail à transformer aide à l'identification des besoins et à l'anticipation de l'usage et l'intégration du futur l'artefact. De plus, elle leur permet de se l'approprier pendant la conception.

Les caractéristiques cognitives des activités de conception au niveau individuel concernant la génération, la transformation et l'évaluation de représentations de la solution sont également valables en situation de conception collective. Elles sont cependant complétées par des processus sociaux, tels que l'argumentation, la négociation, la clarification, le compromis ou la régulation. Darses & Falzon (1996) distinguent notamment des processus de *synchronisation cognitive* et de *synchronisation opératoire.* Les premières visent à établir un contexte de connaissances mutuelles tandis que les secondes sont davantage orientées vers la répartition des tâches entre les acteurs de la conception et dans le temps.

On parle d'utilisateurs finaux lorsque les participants impliqués sont les acteurs de la situation de travail qui utiliseront l'outil conçu régulièrement, voire quotidiennement, en interaction directe et dans une activité finalisée (Damodaran, 1996). Néanmoins, dans des situations de travail complexes comme dans le domaine industriel, où les futurs utilisateurs potentiels sont nombreux et dont les compétences sont variées, il peut être difficile de définir un échantillon représentatif d'utilisateurs finaux. Le choix des participants s'effectue alors selon leur

disponibilité, leur intérêt et les dimensions organisationnelles et sociales de leur situation de travail. Ainsi, les représentants des utilisateurs finaux sont parfois éloignés des fonctions opérationnelles quotidiennes. Pour qu'une démarche participative ait du sens, il faut donc diversifier le panel de participants, notamment au niveau du degré d'expertise, et favoriser la comparaison de points de vue avec et entre eux.

Ainsi, dans une démarche de conception participative, les utilisateurs finaux interviennent aux différentes étapes de la conception afin notamment d'améliorer leurs conditions de travail et leurs systèmes de production, de développer leurs compétences (Darses & Reuzeau, 2004). Ils mettent alors en œuvre des processus cognitifs similaires aux autres concepteurs.

4.2.2 Les apprentissages en conception participative

Outre leur dimension *productive* orientée par exemple vers l'élaboration d'un dispositif technique ou, plus globalement, vers la transformation d'une situation de travail, les activités de conception sont également porteuses d'une dimension *constructive* (Barcellini, 2015 ; Samurçay & Rabardel, 2004). Cette dimension constructive renvoie à deux principales formes d'apprentissage (Pastré, Mayen & Vergnaud, 2006), selon qu'il soit *intentionnel* ou *incident*. Il est intentionnel lorsqu'il est souhaité par le sujet, en tant qu'objet de son activité, alors que l'activité productive n'en est que le support. L'apprentissage est incident lorsque par la transformation du réel, le sujet se transforme lui-même, comme cela peut-être le cas en conception. Ainsi, activités productive et constructive sont indissociables, bien qu'elles ne possèdent pas le même empan temporel, car la première se termine avec l'aboutissement de l'action alors que la seconde peut se prolonger au-delà, notamment lors d'un travail réflexif.

Pour préciser notre propos, les apprentissages, relatifs à la dimension constructive d'une activité de conception, peuvent être vus comme « des processus de construction et de réorganisation des connaissances mises en œuvre soit par des sujets individuels, soit à l'intérieur d'un collectif, voire à l'échelle d'un système sociotechnique plus large » (Burkhardt, 2010, p. 31). Cette définition des apprentissages met l'accent sur leur dimension sociale qui est importante en conception. Il faut en effet rappeler que les activités de conception sont généralement collectives plutôt qu'individuelles. Se pose alors la question du rôle du collectif en conception sur l'évolution des représentations individuelles des concepteurs et sur leurs apprentissages mutuels. Cette notion d'apprentissages mutuels a une origine commune avec la conception participative. Ils sont décrits en particulier dans la

littérature scandinave lors d'activités de conception participative de systèmes informatiques (Ehn, 1998).

D'après la métaphore du « *dialogue avec la situation* » de Schön (1992), à chaque action d'un concepteur, la situation réagit et apporte de nouvelles informations, ce qui peut susciter des apprentissages. Or, dans une démarche participative, les autres concepteurs répondent et apportent également de nouvelles informations. Par conséquent, pour un concepteur, ces apprentissages sont orientés par les hypothèses que constitue le travail d'autrui (Béguin, 2013). Or « *les décisions de conception ouvrent et ferment des pans entiers de l'activité future et certaines formes d'activité seront possibles d'autres, empêchées* » (Daniellou, 2007, p. 80). Par conséquent, l'hypothèse peut être validée, remise en mouvement ou rejetée, et créer ainsi de l'inattendu ou de la nouveauté, ce qui peut constituer chez l'émetteur une nouvelle source d'apprentissages. Ainsi, hypothèses et apprentissages sont articulés de manière cyclique tout au long de la conception et donnent lieu à des apprentissages croisés entre concepteurs, opérateurs inclus.

Afin de caractériser ces démarches *dialogiques d'apprentissages mutuels* (Béguin, 2003), Béguin (2007) met en avant trois caractéristiques des activités de conception participatives qui semblent importantes pour favoriser ces apprentissages mutuels : la dynamique sociale des échanges (i), le rôle de l'analyse du travail (ii) et le rôle des ébauches de l'objet en cours de conception (iii).

Premièrement (i), en raison des différentes perspectives des concepteurs et face à la complexité du réel, l'activité de conception donne lieu à des désaccords, des controverses, des incertitudes ou des remises en causes pour les personnes. Le traitement de ces divergences peut prendre deux formes : soit elles sont résolues par le conflit par le jeu de l'autorité et de la soumission avec le risque de mettre la complexité du réel au second plan en excluant les acteurs qui ne sont pas d'accord ; soit elles passent par la modification des caractéristiques de l'objet en cours de la conception ou des critères d'atteinte du but. Cette modification peut être source d'apprentissages mutuels dans la mesure où les solutions recherchées visent à prendre en compte la diversité des problèmes vécus par certains concepteurs.

Deuxièmement (ii), l'analyse du travail vise ainsi à outiller les acteurs de la conception, et en particulier les opérateurs, en rendant compte des développements de l'activité possibles ou non d'un point de vue objectif. Ainsi les repères descriptifs et prescriptifs (Garrigou, Thibault,

Jackson & al., 2001) résultant de cette analyse assistent la réflexion des opérateurs en conception.

Troisièmement (iii), l'artefact en cours de conception joue un rôle dans les apprentissages mutuels. Mer, Jeantet & Tichkiewitch (1995) insistent sur l'importance des vecteurs des hypothèses des concepteurs pour la dimension dialogique du processus. Les objets intermédiaires de la conception participent notamment à la construction des représentations des concepteurs (Visser, 2009) et permettent de focaliser les échanges en cristallisant le résultat de leur action.

4.3 Bilan sur les apprentissages en conception

Les travaux présentés dans cette partie visaient à rendre compte des formes d'apprentissages liées aux activités de conception du point de vue de l'ergonomie. L'approche cognitiviste permet de caractériser ces activités à un niveau individuel et de les considérer comme des activités de génération, de transformation et d'évaluation de représentations chez les concepteurs. Ces trois formes de constructions de représentations présentent un intérêt pour l'étude des formes d'apprentissages en conception dans la mesure où elles s'appuient sur les connaissances des concepteurs.

De plus, la distinction des dimensions productives et constructives (Samurçay & Rabardel, 2004) des activités de conception nous permet de faire le postulat que des formes d'apprentissages ont lieu dans ces activités. Celles-ci induisent en effet des constructions et des réorganisations des connaissances chez les concepteurs, notamment lors d'apprentissages incidents. Or, l'activité productive des concepteurs renvoie à la modification de leurs représentations afin de transformer l'activité des participants. Ces représentations sont à la fois externes, c.-à-d. les objets intermédiaires, et internes, sur l'anticipation de l'activité future intégrant l'artefact à concevoir. Par conséquent, l'évolution des représentations des concepteurs doit être liée à leurs apprentissages.

La littérature a largement montré que les processus de conception étaient sources d'apprentissages pour les concepteurs (p. ex. Barcellini, 2015 ; Béguin, 2003 ; Burkhardt, 2010 ; Ehn, 1998). À ce titre, les démarches de conception participatives apparaissent particulièrement intéressantes pour les apprentissages mutuels qu'elles peuvent induire (Béguin, 2003).

De plus, Béguin (2004) montre que les hypothèses des concepteurs jouent un rôle important dans leurs apprentissages lorsqu'elles sont validées, rejetées ou remises en mouvement. Ces dynamiques d'évolution des hypothèses de conception font écho, selon nous, aux transformations et aux évaluations de représentations déjà mentionnées. Les hypothèses de conception sont donc centrales dans l'activité des concepteurs.

5 Caractérisation des hypothèses de conception

Afin d'étudier les hypothèses formulées par les concepteurs, nous proposons de les caractériser selon trois composantes :

- Les *caractéristiques* de l'activité existante et de l'activité de conception antérieure ;
- Les *choix* de conception relatifs aux caractéristiques de l'artefact à définir ;
- Les *effets* attendus de ces choix de conception sur l'activité future.

Une hypothèse de conception prend alors la forme suivante : « *en considérant tel caractéristique(s), tel choix de conception devrait aboutir à tel(s) effet(s)* ». Ainsi les caractéristiques d'une activité existante ou de choix antérieurs permettent de justifier les choix de conception présent, eux-mêmes porteurs d'attentes relatives à l'activité future.

Les représentations internes renvoient aux buts, aux stratégies, aux procédures, aux connaissances du domaine, aux contraintes et aux critères mobilisés au fil de la conception (Darses, 2009). Elles peuvent donc être mobilisées au niveau des justifications des choix de conception et des attentes dont ils sont porteurs. Les objets intermédiaires font quant à eux référence aux représentations externes sur lesquelles s'appuient les concepteurs : il représente le futur produit et, en même temps, le processus dont il est le résultat (Mer & al., 1995). Le tableau 2 synthétise ces liens entre représentations et hypothèses.

Les représentations internes se distinguent cependant des hypothèses de conception par leur caractère individuel, alors que les hypothèses sont communes aux concepteurs. Ces dernières sont en effet centrées sur les choix de conception, qui renvoient à des décisions collectives concernant la définition des caractéristiques d'un artefact.

De plus, les représentations internes des concepteurs sont subjectives et peuvent évoluer d'elles-mêmes, sans impacter immédiatement les hypothèses de conception. Elles reposent en

effet sur les connaissances des concepteurs, que leurs apprentissages en conception peuvent faire évoluer.

COMPOSANTE DES HYPOTHÈSES DE CONCEPTION	REPRÉSENTATIONS DES CONCEPTEURS
Caractéristiques de l'activité existante et de l'avancement de la conception	Connaissances du domaine, critères, contraintes, buts, stratégies, procédures dans l'activité existante, objets intermédiaires
Choix de conception relatifs aux caractéristiques de l'artefact à définir	/
Effets attendus de ces choix de conception sur l'activité future	Buts, stratégies, procédures dans l'activité future

Tableau 2. Liens entre hypothèses de conception et représentations des concepteurs

Les *choix de conception* correspondent aux décisions prises par les concepteurs concernant les caractéristiques de l'artefact à concevoir. Celui-ci est présenté en détail dans le chapitre suivant. Ils ont un rôle de pivot dans les hypothèses de conception entre d'une part, l'activité existante des participants et leur activité de conception antérieure, et d'autre part, leur activité future potentielle, transformée par l'activité de conception. Au cours de la conception, ces choix peuvent être générés, transformés et évalués et participent ainsi aux constructions de représentations de concepteurs. L'étude de ces choix tout au long de la conception peut donc servir de grille d'analyse de l'évolution des représentations des concepteurs.

Les *caractéristiques de l'activité existante ou des choix de conception antérieurs* sont mobilisées au fil des échanges afin de justifier les choix de conception. Elles renvoient selon nous aux connaissances des différents participants concernant les activités d'enseignement et d'apprentissage sans TICE. Cependant, elles ne s'y limitent pas, car les concepteurs acquièrent des connaissances lors de la conception, sur leur pratique (Sanchez & Monod-Ansaldi, 2015) et sur le processus de conception en lui-même. Par conséquent, comme le suggère Burkhardt (2010) il serait intéressant de distinguer les connaissances préexistantes de celles qui résultent d'apprentissages en conception.

Les *effets attendus* correspondent aux caractéristiques prévues de l'activité future des participants, lorsqu'elle intégrera les produits de l'activité de conception. Elles font référence à la dimension incertaine des hypothèses de conception résultant du caractère « mal défini » des problèmes de conception (Simon, 1973). Cette incertitude peut être réduite grâce aux objets intermédiaires et à la confrontation au réel, qui permettent de valider, de rejeter ou de remettre en mouvement une hypothèse.

En conclusion, la notion d'hypothèse de conception que nous posons ici doit nous permettre d'étudier les formes d'apprentissages pouvant aboutir à des modifications des pratiques enseignantes dans une activité future instrumentée par le produit de la conception. Celles-ci apparaissent sous la forme des effets attendus des résultats de la conception. Les choix de conception finaux sont justifiés par les caractéristiques de l'activité existantes, incluant les connaissances et les savoir-faire des opérateurs, et de l'avancement de la conception dont rendent compte les objets intermédiaires.

6 Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre que les TICE pouvaient favoriser la transformation des pratiques d'enseignement et d'apprentissage afin les améliorer. Cependant, leur intégration reste à ce jour problématique (p. ex. Artigues, 1998 ; Karsenti, Peraya & Viens, 2002). Parmi les limites à cette intégration, la formation aux TICE apparaît prépondérante pour aider les enseignants à transformer leurs pratiques grâce à ces outils. Ils ont pour cela besoin de certaines connaissances vis-à-vis de la technologie et sur ces usages dans leur activité.

Le modèle des TPACK (Koehler & Mishra, 2005) présente un intérêt pour étudier ces connaissances selon trois dimensions non exclusives : les connaissances liées au contenu disciplinaire, les connaissances liées aux pratiques pédagogiques et les connaissances liées à la technologie. De plus, des travaux mobilisant ce modèle ont permis de rendre compte des apprentissages en termes de développements des TPACK par intégrations de connaissances de différents types. Cela peut alors être assimilé à une réorganisation des connaissances des enseignants.

La littérature sur les activités de conception est suffisante pour faire le postulat qu'il y a effectivement des apprentissages en conception (p. ex. Barcellini, 2015 ; Béguin, 2003 ; Burkhardt, 2010 ; Ehn, 1998). Les activités de conception participatives de TICE peuvent constituer une modalité intéressante pour la formation des enseignants afin de les aider à transformer leurs pratiques d'enseignement. L'approche *Design-Based Research* relie notamment les apprentissages des enseignants à l'évolution conjointe de leurs savoir-faire et de leurs connaissances.

Les travaux en ergonomie cognitive peuvent nous aider à étudier l'évolution de ces deux composantes des pratiques enseignantes. Les activités de conception peuvent en effet être vues comme des activités de construction de représentations (Visser, 2009). Nous avons montré que ces représentations pouvaient renvoyer aux hypothèses de conception (Béguin, 2003). Nous avons proposé de les définir par trois composantes : des caractéristiques des activités (d'enseignement ou de conception) passées, des choix de conception et des effets attendus. Ces hypothèses évoluent au fil de l'activité de conception, comme les représentations des concepteurs. En particulier, les choix de conception peuvent faire l'objet de génération, de transformation et d'évaluation avec l'avancement des solutions de conception. En outre, elles peuvent également rendre compte de la dimension constructive de leur activité. Elles sont en effet validées, rejetées ou remises en mouvement et font écho aux transformations et aux évaluations de représentations (Visser, 2009). Pour Béguin (2013), l'évolution de ces hypothèses crée de l'imprévu et de la nouveauté et participe ainsi aux apprentissages mutuels entre concepteurs.

Enfin, nous avons vu que les choix de conception peuvent avoir un rôle central dans les hypothèses de conception. Il est donc nécessaire de présenter l'artefact à concevoir afin d'identifier les caractéristiques sur lesquels ces choix peuvent porter. De plus, nous avons vu que les hypothèses, et donc les choix, évoluaient au cours d'une activité de conception. Il faut donc également la caractériser d'un point de vue longitudinal si l'on veut discuter des dynamiques des hypothèses de conception.

Le chapitre suivant aborde ces questions en présentant la technologie émergente mobilisée, c.-à-d. des interfaces tangibles sur table interactive, et en présentant les différentes étapes d'un processus de conception.

Chapitre 3 LA CONCEPTION AVEC DES TECHNOLOGIES EMERGENTES

Ce chapitre porte aborde l'impact de la technologie mobilisée en conception, c.-à-d. des interactions tangibles sur tables interactives, sur l'activité future en classe, sur le processus de conception global et sur les caractéristiques des choix de conception.

Dans un premier temps, les spécificités techniques de la technologie sont présentées, ainsi que des exemples d'applications existantes. Les modalités d'interactions propres aux interactions tangibles sur tables interactives sont discutées, en lien avec leur intérêt pour des activités d'enseignement et d'apprentissage.

Au regard de ces caractéristiques, de celles du projet Tactileo plus globalement et des limites actuelles à l'intégration des TICE, l'intérêt de définir conjointement une application tangible et ses usages futurs est ensuite discuté. Une décomposition de cet artefact à concevoir est alors proposée afin d'outiller les analyses empiriques concernant les choix de conception.

Dans la troisième partie de ce chapitre, l'impact du caractère émergent de la technologie sur le processus de conception est abordé. La question des besoins de futurs utilisateurs vis-à-vis de ce type de technologie peu mature et peu connue y apparaît prépondérante.

Enfin, la dernière partie s'appuie sur les connaissances plus génériques concernant les processus de conception afin d'offrir une vision globale de ces processus. Elle vise à outiller la formalisation du processus en caractérisant les choix de conception selon leur niveau d'abstraction afin d'étudier par la suite les processus d'innovation et d'intégration associées à ces différents niveaux.

1 Les tables interactives et les interfaces tangibles

1.1 Présentation générale

Les tables interactives sont des dispositifs informatiques qui peuvent être caractérisés par leur forme de table avec un écran large et horizontal qui détecte des interactions tactiles multiples

(Kubicki, 2011). Elles ont pour principe général de permettre des interactions collectives sur de grandes surfaces qui affichaient différents médias (Benko, Morris, Brush & Wilson, 2009).

Kubicki (2011) différencie 3 types principaux de tables : celles qui sont uniquement tactiles et qui permettent à l'utilisateur d'interagir avec des objets virtuels ; celles qui lui permettent d'interagir en manipulant des objets tangibles, réels, qui sont reconnus par les tables interactives ; et les mixtes qui supportent à la fois les interactions tactiles et tangibles. Dans la suite de ce document, nous nous intéresserons à ce dernier type de table interactive.

Les interfaces tangibles ont émergé dans les années 90, en particulier grâce aux travaux de : Fitzmaurice, Ishii & Buxton (1995) sur une « *Graspable Interface »,* permettant de manipuler des objets numériques avec des cubes de bois ; et ceux Ishii et Ullmer (1997) sur les « Tangible Bits » qui ont posé les fondations pour les travaux ultérieurs sur les interactions tangibles. Il s'agissait initialement d'étudier l'utilisation d'objets réels pour donner une forme physique à des informations numériques et permettre une manipulation plus directe d'un système numérique.

Le concept de manipulation directe, centrale dans les interactions tangibles, a émergé dans les années 80 et se définit par deux dimensions (Hutchins, Hollan & Norman, 1985) :

- La correspondance entre une manipulation d'entrée et ce qu'affiche le dispositif numérique, par exemple l'articulation entre une souris et le pointeur à l'écran (*articulatory directness)* ;
- la correspondance sémantique entre la représentation virtuelle (*la métaphore*) et son référent dans le monde réel, comme l'icône de la corbeille (*semantic directness*).

Les interfaces tangibles favorisent une plus forte correspondance à ces deux niveaux que le couple clavier-souris habituel. Elles offrent également une plus grande diversité que les interfaces tactiles grâce aux formes des objets tangibles et à leur manipulation.

Par définition, les interfaces tangibles englobent un grand nombre d'interfaces homme-machine. Shaer & Hornecker (2010) décrivent quatre types interfaces homme-machine qui peuvent être reliés au champ des interactions tangibles : les dispositifs ambiants, les interfaces « *embarquées* » ou « *incarné*es » (Embodied User Interfaces), les interfaces de type « réalité augmentée tangible » et les interfaces tangibles sur table interactive. Ullmer, Ishii & Jacob (2005) distinguent trois types d'interfaces : des surfaces interactives sur lesquels sont

manipulés des objets tangibles, des interfaces qui contraignent les interactions possibles avec leurs objets tangibles et des assemblages de blocs modulaires connectés (voir Figure 4).

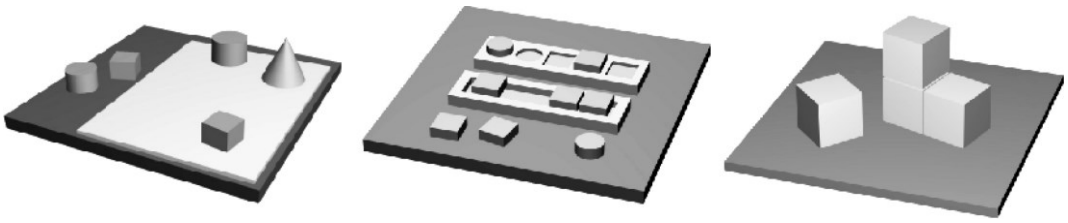


Figure 4. Exemple de taxinomie pour les interfaces tangibles (Ullmer & al., 2005, p. 83)

Dans la suite de ce document, nous nous intéresserons uniquement aux interfaces qui proposent de manipuler des objets tangibles sur l'écran d'une table interactive comme les exemples de la figure 5. Fishkin (2004) donne une définition large des interfaces tangibles en les décomposant en trois parties : un événement *d'entrée* (1), typiquement la manipulation physique d'un objet, est détecté par le *système* (2), dont l'état est alors modifié, et qui renvoie un événement en *sortie* (3), un *feedback*, qui correspond à un changement des propriétés d'un objet, par exemple l'affichage d'images sur l'écran.

En 2009, une grande diversité de tables interactive avait vu le jour (Kubicki, 2011) et de nombreuses idées d'applications ont été proposées, principalement dans le cadre de travaux de recherche. Plusieurs auteurs ont tenté de rendre compte des différents usages possibles sur table interactive, avec interaction tangible ou non (voir par exemple Benko, Morris, Brush & Wilson, 2009 ; Chaboissier, 2012 ; Scott, Grant & Mandryk, 2003), dont voici une liste non exhaustive :

- pour des activités bureautiques ou de dessin, avec des tables de dessin numériques (p. ex. Active Desk [Fitzmaurice, Ishii & Buxton, 1995]) ;
- pour le divertissement, avec par exemple des logiciels vidéo-ludiques (p. ex. PlayAnywhere [Wilson, 2005]) ou des applications musicales multi-joueurs (p. ex. reacTable [Jordà, Geiger, Alonso & al., 2007]) ;
- pour les activités créatives (p. ex. Buisine, 2007) ;
- pour la visualisation et l'investigation d'environnements complexes : metaDESK (Ullmer & Ishii, 1997) ;

- pour l'apprentissage (Dillenbourg & Evans, 2011), par exemple l'expérimentation augmentée en chimie (p. ex. Sensetable [Patten, Ishii, Hines & al., 2001]) ou en optique (p. ex. Price, Falcão, Sheridan & al., 2009) ;
- pour le travail collaboratif (p. ex. Price & al., 2009) ;
- en conception créative (p. ex. en brainstorming [Buisine, 2007]) ;

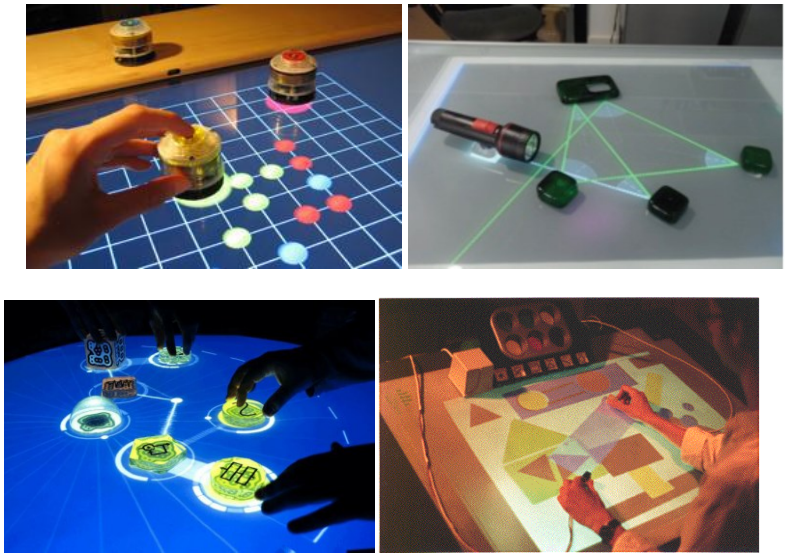


Figure 5. Exemples d'interfaces tangibles : *TViews* (Mazalek, 2006) ; Price & al. (2009) ; *ReacTable* (Jordà & al., 2007) ; Active Desk (Fitzmaurice & al., 1995)

Ces exemples laissent suggèrent des tables interactives et les objets tangibles pourraient être pertinents dans des activités telles que les situations d'enseignement et d'apprentissage. Ces dernières impliquent en effet plusieurs utilisateurs dont l'activité est par moment dirigée vers un même objet. Un dispositif technique qui servirait à la fois de support à la collaboration et à la visualisation collective présente donc, a priori, un intérêt.

1.2 Les tables interactives et les interfaces tangibles, des technologies émergentes

Les tables interactives et les interfaces tangibles peuvent être qualifiées de *technologies émergentes* définies par (Kjeldskov, 2003, cité par Anastassova, 2006, p. 17) :

- un caractère novateur, une avancée technologique importante, partiellement réalisée ou en devenir ;
- des usages peu clairs et peu différenciés ;

- plusieurs limites qui en ralentissent l'application massive ;
- une promesse de transformation du contexte économique et social dans lequel elle sera introduite.

D'après la description qui a été faite des technologies mobilisées, c.-à-d. des tables interactives et des objets tangibles, nous pouvons dire qu'elles répondent à ces critères. En effet, ces technologies, sans être très récentes, apparaissent novatrices dans les interactions qu'elles proposent. Les exemples d'usages que nous avons cités (p. ex. bureau augmenté, investigation d'environnements complexes, brainstorming ou divertissement) constituent des pistes d'usages peu stabilisés qu'il faut développer davantage pour que ces technologies puissent être déployées plus largement. Le prix des tables interactives actuelles (plusieurs milliers d'euros) présente la principale limite à leur déploiement massif. À cela s'ajoute le manque de maturité des techniques de détection des interactions tangibles, p. ex. les tables interactives à détection optique sont peu utilisables dans des environnements très lumineux. Enfin, s'il est difficile de discuter des éventuelles transformations du contexte économique, il est en revanche probable et souhaitable que les tables interactives aient un impact sur les modalités de travail collectif (p. ex. Price & al., 2009).

Au regard de notre objet de recherche, l'effet de ce caractère émergent des tables interactives sur le processus de conception doit être étudié. Il peut en effet impacter les améliorations des activités d'enseignement et d'apprentissage, l'intégration de ces technologies dans ces activités et donc, indirectement, sur les apprentissages des concepteurs.

1.3 Cadres théoriques sur les interactions tangibles

Avec le développement des interfaces tangibles, des cadres de travail et des taxinomies ont été proposées afin d'outiller les chercheurs dans la conception et dans l'étude des usages de ces interfaces (p. ex. Fitzmaurice, Ishii & Buxton, 1995 ; Ullmer & Ishii, 2000 ; Van Den Hoven & Eggen, 2004). Une caractéristique récurrente de ces travaux, propre aux interfaces tangibles, renvoie à la notion de *manipulation directe* (Hutchins & al., 1985), c.-à-d. le couple *manipulation physique/correspondance sémantique*.

Parmi les travaux ayant un lien avec la manipulation directe, Koleva, Benford, Hui & al. (2003) ont défini la notion de *continuum de cohérence* (cf. Figure 6). Celui-ci permet de caractériser le lien entre un objet physique et un objet virtuel, c'est à dire, dans quelle mesure des objets physiques et virtuels peuvent être perçus comme la même chose. Les auteurs proposent plusieurs propriétés pour situer une interface tangible sur le continuum, en

particulier sur les similarités dans l'interaction (p. ex. littérale lorsque le déplacement d'un objet physique provoque le déplacement de l'objet virtuel associé) ou l'exclusivité du lien (c.-à-d. si un objet peut être associé à un seul objet virtuel ou à plusieurs).

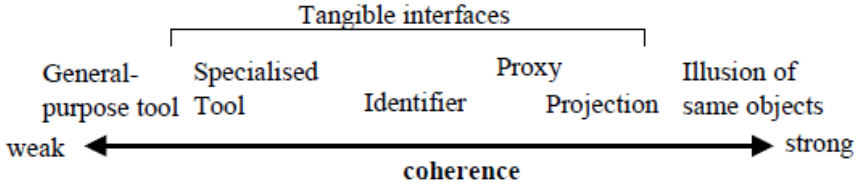


Figure 1: TUI categories along the coherence continuum

Figure 6. Continuum de cohérence d'une interface tangible (Koleva & al., 2003, p. 47)

De façon similaire, Fishkin (2004) propose de définir le *degré de tangibilité* d'une interface d'après deux dimensions : la personnification (*embodiment*) et la métaphore. La personnification concerne principalement le couplage entre une entrée et une sortie, selon qu'elles soient confondues ou distinctes. La notion de métaphore peut être décrite par l'analogie entre l'action d'un utilisateur et l'effet qu'aurait cette même action dans le monde réel. L'auteur en distingue deux types : la *métaphore de nom,* qui porte sur l'analogie entre les propriétés de l'objet tangible et des objets du monde réel, et la *métaphore de verbe* qui a trait à la correspondance l'acte manipulation et avec des actions de tous les jours.

Pour les situations d'apprentissage, Price & al. (2009) ont proposé un cadre d'analyse dédié aux situations d'apprentissage avec des interfaces tangibles. Les auteurs identifient plusieurs dimensions pour caractériser une interface tangible (Figure 7). Trois paramètres principaux apparaissent particulièrement importants pour notre démarche de conception : la *localisation* d'une représentation numérique associée à un objet tangible (séparées, adjacente ou embarquées), la *dynamique* d'affichage entre ces mêmes éléments, c.-à-d. le lien entre une information virtuelle et un objet tangible au cours de sa manipulation, et la *correspondance*, c.-à-d. les métaphores choisies au niveau physique ou virtuel.

Ces éléments présentent un intérêt pour caractériser une interface tangible et mettent l'accent sur les caractéristiques particulières de ce type d'interface, p. ex. les choix de représentation de l'information et les manipulations possibles. Cependant, ils informent peu sur l'effet de ces caractéristiques sur l'apprentissage, en particulier concernant les questions liées aux métaphores utilisées (Fishkin, 2004 ; Price & al. 2009), qui ont été prépondérantes dans notre

activité de conception. Néanmoins, au regard des choix possibles pour ces différentes caractéristiques, les travaux décrits plus haut présentent un intérêt en conception d'interface tangible pour orienter et articuler les échanges autour de ces éléments clés.

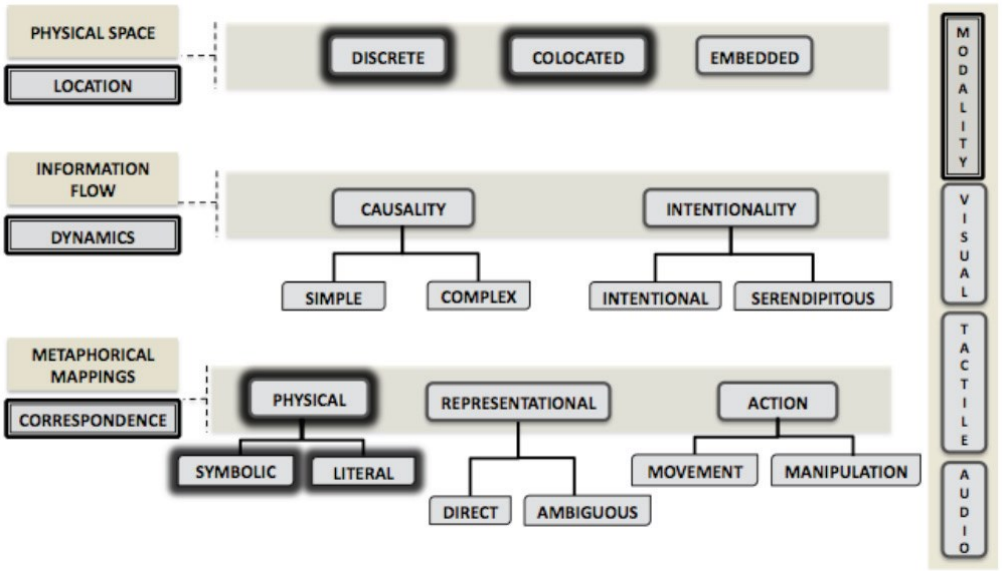


Figure 7. Cadre d'analyse des interactions tangibles pour l'apprentissage de Price & al. (2009, p. 85)

1.4 Les rôles de la manipulation physique dans l'apprentissage

De nombreuses études ont porté sur l'intérêt de la manipulation d'objets physique pour l'apprentissage. Salehi, Schneider & Blickstein (2014) suggèrent par exemple que la manipulation physique pourrait avoir un effet positif sur la compréhension des élèves par rapport à des formes d'interaction plus classique, c.-à-d. clavier/souris, dans le cas d'une application de simulation scientifique.

La manipulation d'objets physiques concrets peut favoriser la compréhension dans des tâches symboliques par rapport à l'utilisation de représentations plus abstraites (O'Malley & Fraser, 2004). Papert (1980) a notamment constaté chez des enfants qu'ils avaient des connaissances profondes et implicites construites à partir de leur expérience sensorimotrice et que la manipulation d'un autre « corps » favoriserait l'explicitation de ces connaissances.

De plus, la manipulation physique pourrait également permettre de libérer des ressources cognitives qui pourraient être allouées au traitement d'informations pertinentes du domaine étudié. D'une part, l'organisation et la manipulation spatiale d'objets permettraient à un élève

de garder une trace visuelle et immédiate de ses actions (Manches & O'Malley, 2012). D'autre part, les actions motrices pourraient également aider à « *alléger* » la cognition par des actions non directement orientées vers la tâche permettant d'économiser des ressources cognitives qui seraient alors allouées à la tâche de mémorisation (Goldin-Meadow, Nusbaum, Kelly & al., 2001)

Enfin, dans des contextes plus ludiques (jeu de puissance 4, jeu d'échecs ou jeu vidéo Tetris), Kirsh & Maglio (1994) ont distingué deux types d'action physique : les actions orientées directement vers l'atteinte d'un but, c'est-à-dire les actions *pragmatiques* et les actions *épistémiques*, qui ont pour but de mettre au jour des informations « cachées » ou difficiles à traiter en l'état. Les objets tangibles pourraient favoriser ces actions épistémiques, ce qui réduirait par exemple le coût cognitif d'une projection mentale (Esteves, van den Hoven & Oakley, 2013) et favoriserait les démarches par essais-erreurs. Dans ce sens, Schneider & Blickstein (2015) soutiennent que des tâches exploratoires collectives autour d'applications tangibles donneraient de meilleurs résultats que des approches plus classiques basées sur une leçon suivie d'une tâche pratique dans les disciplines scientifiques.

Ainsi, la manipulation physique des objets tangibles peut jouer un rôle dans l'apprentissage des élèves. Néanmoins, les études présentées ici renvoient à des utilisations de ces objets en situation réelle. Elles informent peu la conception en elle-même, car la façon dont les utilisateurs manipuleront les objets (leurs objectifs, la nature épistémique ou pragmatique des actions, etc.) est difficile à anticiper.

1.5 Les activités collectives avec des tables interactives

Les études décrites plus haut portent pour la plupart sur l'activité individuelle d'élèves en situation d'apprentissage. Cependant, les interactions tangibles sur table interactive pourraient présenter un intérêt pour les activités collectives. Ainsi, dans ses travaux sur l'environnement de programmation tangible *LOGO*, Papert (1980) soutient que l'explicitation du raisonnement d'un élève par la manipulation physique d'objets réels lui permet d'en prendre conscience, mais également de l'exprimer verbalement et physiquement, ce qui le rend « *visible* » pour lui et pour d'autres. Par ailleurs, pour Sluis, Weevers, Schijndel & al. (2004), la collaboration entre des enfants autour d'une table interactive serait naturelle du fait de la forme du dispositif et des modes de communication verbale et non-verbale qu'il offre. Kubicky, Lepreux & Kolski (2011) ont quant à eux observé un grand nombre d'interactions et d'échanges entre des

élèves et leur enseignant autour d'une application tangible sur table interactive dédiée à l'apprentissage et à la reconnaissance des couleurs pour de jeunes enfants.

Dans le champ du travail collaboratif assisté par ordinateur, ou CSCW (pour Computer Supported Collaborative Work), des travaux rendent compte du potentiel des tables interactives. Plusieurs auteurs suggèrent que ce type d'outil serait bénéfique pour les performances et la motivation en situation de collaboration (p. ex. Buisine, Besacier, Aoussat & al., 2012) et qu'il favoriserait une participation plus équitable et plus coordonnée des utilisateurs (Rogers, Lim, Hazlewood & al., 2009).

1.6 Recommandations pour la conception de TICE avec des tables interactives

Dans le domaine de l'apprentissage collaboratif assisté par ordinateur, ou CSCL pour Computer Supported Collaborative Learning, plusieurs études ont porté sur les tables interactives (Dillenbourg & Evans, 2011). Scott & al. (2003) ont par exemple proposé des recommandations pour la conception de dispositifs d'apprentissage pour favoriser la collaboration autour d'une table interactive. D'après les auteurs, la technologie devrait :

- favoriser les interactions interpersonnelles, dans la mesure où elles sont au cœur de la collaboration ;
- permettre des transitions fluides entre les activités sur la table interactive ;
- faciliter les transitions entre travail individuel et travail en groupe ;
- assurer une bonne intégration des sous-tâches collaboratives autour du dispositif dans l'activité d'apprentissage de façon plus globale ;
- permettre l'utilisation d'objets sur la table, à la fois des objets tangibles et non tangibles tels que les cahiers ;
- fournir un accès partagé aux objets physiques et numériques, tels que les objets tangibles et les éléments affichés à l'écran, pour focaliser l'activité collaborative et faciliter la prise d'information de l'ensemble du groupe sur un élément spécifique ou un ensemble d'éléments ;
- permettre des interactions, quelle que soit la position des élèves autour de la table interactive, en particulier concernant l'orientation des éléments de l'interface ;

- prendre en compte les actions simultanées selon le type d'activité attendue des élèves : en parallèle, séquentielle, indépendante ou hiérarchisé par différents rôles.

Plus largement, Dillenbourg & Evans (2011) ont proposé un cadre d'analyse de l'activité basé sur quatre *cercles d'interaction* correspondant au niveau de granularité de l'activité d'apprentissage avec des tables interactives :

- le premier niveau correspond aux interactions utilisateur système et considère l'activité individuelle. Il renvoie notamment aux points abordés haut sur les représentations et les interactions individuelles ;
- le deuxième niveau porte sur les interactions entre élèves autour d'une table interactive, en particulier au sein d'un groupe d'élèves ;
- le troisième niveau s'intéresse à l'*orchestration de la* classe, décrite par Dillenbourg et Jermann (2010) comme l'influence globale de la technologie sur les pratiques d'enseignement au niveau de la classe ;
- le dernier niveau est le plus large et fait référence au contexte dans lequel sont utilisées les tables interactives, p. ex. un contexte plus ou moins formel, voire proche du jeu.

Ces deux travaux mettent en avant l'intérêt de considérer les interactions d'élèves ou d'enseignants autour d'une table interactive et avec des objets tangibles d'un point de vue global. En effet, pour qu'une telle technologie soit mobilisée avec efficacité dans un dispositif d'enseignement et d'apprentissage, les concepteurs doivent tenir compte des facteurs qui influencent ces activités. En particulier, les interactions sociales, c'est-à-dire les échanges entre élèves ou les interactions élèves-enseignant, et la gestion de la classe intégrant la technologie, ou *orchestration*, doivent être abordées en conception.

1.7 Synthèse sur les tables interactives pour l'enseignement et l'apprentissage

Les éléments conceptuels présentés dans les parties précédentes montrent que les tables interactives et les interactions tangibles peuvent présenter un intérêt dans des activités d'enseignement et d'apprentissage (p. ex. la manipulation physique, la collaboration entre utilisateurs). Ils outillent également l'intervention en soulevant des points clés à discuter lors en conception de formation avec ce type de technologie (p. ex. les représentations associées aux éléments de l'interface tangible et les différents niveaux des activités d'enseignement et d'apprentissage à prendre en compte).

De plus, d'après les recommandations pour la conception d'interfaces tangibles pour la formation, l'artefact global à concevoir devrait intégrer à la fois la technologie, c.-à-d. l'application tangible à concevoir, et les caractéristiques de l'activité d'enseignement future (cf. la notion de *cercles d'interaction*). Cela permettrait de répondre aux difficultés actuelles d'intégration des TICE évoquées précédemment (p. ex. Artigues, 1998 ; Karsenti, Peraya & Viens, 2002). La partie 2 propose de caractériser l'artefact à concevoir afin d'y intégrer l'ensemble de l'activité des enseignants instrumentée par une application tangible.

En outre, à l'exception des travaux en CSCL (p. ex. Dillenbourg & Evans, 2011 ; Scott & al. 2003) peu de résultats stabilisés et réutilisables directement en conception ont été relevés. Cela s'explique par le caractère émergent des tables interactives et à leur manque de maturité. Ces propriétés soulèvent également des questions sur les caractéristiques des processus de conception sur ce type de technologie auxquelles la partie 3 tente de répondre.

2 Construction conjointe d'un artefact et de ses usages

2.1 L'artefact et ses usages comme objets de l'activité de conception

2.1.1 La notion d'artefact

Darses & Falzon (1996) distinguent deux types d'activité de conception : celles qui portent sur des artefacts matériels et celles qui concernent la génération de dispositifs symboliques ou abstraits. Le terme artefact désigne un produit ou un phénomène créé ou transformé par l'homme pour être utilisé dans des activités finalisées. Il peut donc être de différentes natures, par exemple matérielle, cognitive, psychologique ou sémiotique (Rabardel, 1995 ; Bourmaud, 2006).

À partir de cette définition, Visser (2009, p. 11) indique qu'une activité de conception « consiste à spécifier un artefact, à partir de spécifications de départ qui indiquent — en général de façon ni explicite, ni exhaustive — les fonctions à remplir par l'artefact, ainsi que les besoins et buts qu'il doit satisfaire étant données certaines conditions (exprimées par des contraintes) ». Dans la suite de ce document, nous reprenons cette définition en précisant que l'artefact à concevoir peut être de nature technique, symbolique ou abstraite. Il peut également correspondre à leur combinaison.

2.1.2 Conception d'un artefact et développement de l'activité

Les travaux de Béguin (2013) soulignent l'intérêt d'aborder en conception à la fois les caractéristiques d'un artefact en cours d'élaboration et l'activité future dans laquelle il doit s'intégrer. Il distingue notamment trois perspectives en conception : la *cristallisation*, la *plasticité* et le *développement*.

La *cristallisation* est la plus ancienne. Elle repose sur l'idée qu'un artefact « cristallise » une représentation ou un modèle de l'utilisateur futur et de son activité au travers des choix qui sont effectués lors de la conception. Ces choix reposent sur une vision « figée » de l'activité existante dans laquelle l'artefact doit être intégré en se basant sur des modèles du fonctionnement de l'Homme, par exemple anthropométriques, et de son activité. Cette perspective présente le risque que le résultat de la conception ne soit pas adapté ou qu'il soit source de difficultés pour les opérateurs par manque d'anticipation de son intégration dans la situation de travail cible.

La *plasticité* va plus loin soulignant que l'anticipation de l'activité future (Daniellou, 2004) est indispensable, mais qu'elle présente des limites en raison de la diversité et des formes de variabilité inhérentes à toute situation de travail. Elle préconise par conséquent la conception d'artefacts « plastiques », qui soient suffisamment souples pour offrir des marges de manœuvre aux utilisateurs face à ce qui n'aura pas été prévu en conception.

Enfin, le *développement* s'appuie sur les perspectives précédentes, mais insiste sur la dimension intrinsèque du travail réalisé par un opérateur. Ce dernier met en œuvre le produit de la conception en mobilisant des « manières de faire et de penser » qui résultent de constructions cognitives et culturelles. De plus, l'introduction d'un nouvel artefact change la nature de la tâche et nécessite donc de nouvelles formes d'actions. Celles-ci passent par le développement de nouvelles techniques à partir de celles dont il dispose ou par la modification ou l'adaptation des dispositifs à des constructions existantes. Ce double processus renvoie au concept de genèse instrumentale (Rabardel, 1995) défini dans le paragraphe suivant.

Pour Béguin (2013), les trois perspectives défendent l'idée que l'objet de la conception doit être double : définir les caractéristiques de l'artefact et celles de l'activité des opérateurs, qui sont en interaction. En effet, « la cristallisation souligne que l'activité de travail doit être modélisée en même temps les outils et les dispositifs techniques sont spécifiés. La « plasticité » argumente que l'efficacité des dispositifs ne repose pas uniquement sur les

décisions issues des bureaux d'étude, mais aussi sur l'activité en situation. Et le « développement » défend l'idée que l'activité se développe à la mesure du développement de l'outil.

Cette idée d'objet double de la conception n'est pas nouvelle, elle a notamment émergé dans les années 80 dans le domaine de l'informatique lorsque des chercheurs en Interactions Homme-Machine, ou *HCI (Human-Computer Interaction*), ont commencé à discuter des limites de l'approche, dominante à l'époque en HCI, de la cognition vue comme un ensemble de processus de traitement de l'information, par analogies avec un système informatique. Norman (1980) a, en particulier, souligné que cette approche laissait de côté les autres aspects du comportement humain, les interactions interpersonnelles et avec l'environnement ou encore l'influence de la culture et de l'histoire du sujet. Par conséquent, des approches davantage liées à la théorie de l'activité ont émergé face à ces limites afin de prendre en compte non seulement l'artefact en lui-même, mais aussi le contexte dans lequel il est utilisé, avec ses dimensions finalisée, interpersonnelle, temporelle, socio-culturelle, développementale, etc. (Kaptelinin & Nardi, 2006). En résumé, comme Bannon et Bodker (1989, p. 24, notre traduction), « *l'objet d'étude doit être centré sur les usages, et non sur l'artefact [car] la cognition, telle qu'elle est vue par la théorie de l'activité, est socialement et historiquement située et contrainte par l'environnement physique dans laquelle elle a lieu* ».

Partant de ces résultats, un cadre théorique semble nécessaire pour appréhender plus en détail les caractéristiques de l'artefact à concevoir dans le cadre du projet Tactileo. Le cadre de l'approche instrumentale (Rabardel, 1995) présente à ce titre un grand intérêt.

2.1.3 Intérêt de l'approche instrumentale pour l'étude des activités de conception

L'approche instrumentale (Rabardel, 1995) propose un cadre d'analyse de l'activité médiatisée d'un sujet en activité compatible avec les idées développées dans la partie précédente. Rabardel définit un *instrument* comme une entité mixte composée d'un artefact, ou d'une partie d'un artefact, et de schèmes qui « correspondent aux aspects invariants des actions pour des classes de situation connues » (Rabardel, 1995, p. 112). Ces schèmes sont composés de buts ou de sous-buts, d'invariants opératoires, de règles conditionnelles et de possibilités d'inférences (Vergnaud, 1991). Les instruments sont donc anthropocentrés, car les schèmes renvoient à l'activité finalisée du sujet et à l'objet de son activité, là où l'artefact technique est technocentré.

Les instruments sont construits au travers de *genèses instrumentales* (Rabardel, 1995) correspondant à un double mouvement de l'artefact et des schèmes. D'une part, il y a *instrumentalisation* lorsqu'un sujet enrichit les propriétés d'un artefact par rapport à celles initialement prévues par les concepteurs, par exemple en lui attribuant de nouvelles fonctions. D'autre part, on parle d'*instrumentation* lorsqu'il y a émergence ou évolution des schèmes d'utilisation du sujet. L'instrumentation renvoie à deux processus : l'*assimilation* lorsqu'un schème existant est appliqué à un nouvel artefact et l'*accommodation* lorsqu'un schème est transformé pour s'y adapter.

Les genèses instrumentales sont le fait du sujet dans l'usage (Bourmaud, 2006), c'est-à-dire que les instruments ne préexistent pas à leur usage. Cependant ces genèses instrumentales reposent sur les résultats de la conception initiale concernant les *fonctions constituantes* de l'artefact, définies par les concepteurs, et les *modes opératoires prévus* par ces derniers. La conception se poursuit donc dans l'usage au travers de ces genèses instrumentales (Béguin, 2004). Folcher (2003) illustre cela en distinguant *conception pour l'usage* et *conception dans l'usage* : la première résulte d'une anticipation déficitaire ou limitée des concepteurs et la seconde correspond à la constitution des instruments dans le cadre des genèses instrumentales. Le modèle de la boucle de la conception rend compte de cette distinction dans un cycle de conception itératif (cf. Figure 8).

La phase de con*ception pour l'usage* vise à définir les *fonctions constituantes* et les *modes opératoires prévus*. Ces deux composantes renvoient au couple artefact-schèmes qui caractérise un instrument. Elles s'en distinguent cependant en ce qu'elles sont le fruit de l'anticipation des concepteurs. Lorsque le résultat de la conception est déployé en situation réelle, il peut faire l'objet de genèses instrumentales. Dans cette phase de *conception dans l'usage*, de nouveaux *schèmes d'utilisation* se construisent et l'artefact peut se voir attribuer de nouvelles fonctions : *les fonctions constituées*. Dans un processus itératif, ces résultats de la conception dans l'usage peuvent alors alimenter la conception afin de définir de nouvelles fonctions constituantes et de prévoir des modes opératoires adaptés aux besoins des utilisateurs finaux.

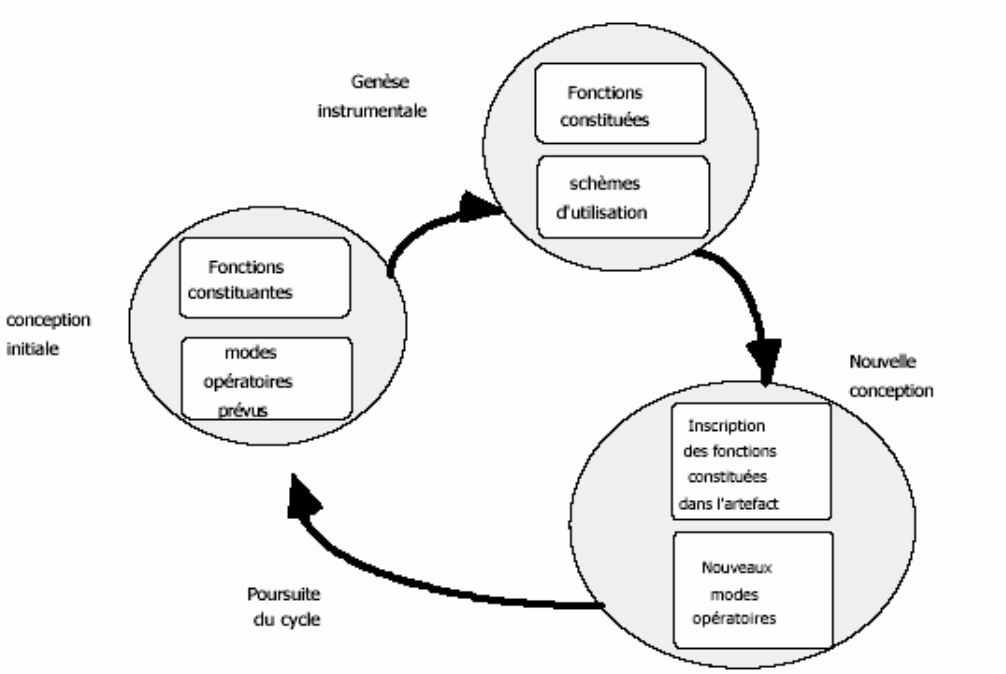


Figure 8. La boucle de la conception (Rabardel, 1995, p. 164)

L'intérêt du modèle de la boucle de la conception, pour notre étude, est de pouvoir caractériser les produits de la conception anthropocentrée en termes de *fonctions constituantes* et de *modes opératoires prévus*. Pour reprendre la perspective des activités de conception comme activités de construction de représentations, les fonctions constituantes et les modes opératoires prévus résultent de telles constructions.

Or, nous cherchons à analyser les enjeux de ces constructions, en termes d'innovation dans les pratiques enseignantes et d'intégration des solutions de conception dans ces pratiques. Pour cela, notre étude ne peut pas se limiter aux résultats finaux de la conception. Elle doit également prendre en compte l'évolution de ces constructions au fil de son déroulement. En cela, les *objets* intermédiaires de la conception peuvent rendre compte de l'évolution des représentations des concepteurs.

2.2 Évolution et caractérisation de l'objet de la conception

2.2.1 Les *objets intermédiaires* de la conception

Les parties précédentes ont montré que le processus de conception doit avoir pour finalité de concevoir, d'une part, les fonctions constituantes d'un dispositif technique et, d'autre part, les modes opératoires prévus des futurs utilisateurs avec cet artefact afin de transformer une

situation de travail donnée. Ce couple représente l'objectif productif de l'activité de conception. Il ne représente cependant pas le seul résultat de cette activité, car lorsque les concepteurs élaborent leurs représentations de « *l'objet à concevoir* », ils créent et mobilisent des artefacts immatériels (règlements, logiciels, modèles numériques) ou matériels (dessins techniques, textes, maquettes, prototypes).

Plusieurs auteurs, en sociologie notamment (p. ex. Jeantet, 1998), se sont intéressés à ces *objets intermédiaires* de la conception. Dans une enquête auprès de 120 réseaux de coopération scientifique, Vinck (1999) a par exemple relevé des objets intermédiaires de différentes natures : maquettes en carton ou en pâte à modeler, prototypes, pièces cassées, listings, copies d'écran, textes, échantillons, etc. Ils avaient plusieurs fonctions : la facilitation, l'induction, le rapprochement, l'empêchement, la dissuasion, etc. Pour Vinck (2009), ils participent : à la construction de compromis et de savoirs partagés entre les acteurs ; à l'orientation ou à l'explication de points de vue ; ou encore à la confrontation de points de vue. Mer, Jeantet & Tichkiewitch (1995) leur donnent deux grandes fonctions indissociables :

- ils servent à modéliser le futur artefact en donnant forme aux représentations construites par les concepteurs et en incarnant une partie de la situation avec laquelle ils sont en « conversation » ;
- ils sont des vecteurs de la coordination des concepteurs en tant que porte-parole de ses producteurs, car ils rendent compte du processus de sa construction. Ils diminuent leurs marges de divergence, ou peuvent servir de point de départ pour les divergences à venir.

En résumé, l'objet intermédiaire, de par sa nature hybride, s'inscrit dans une double temporalité : il représente le futur produit et, en même temps, le processus dont il est le résultat. Dans notre cas, les objets intermédiaires techniques peuvent correspondre à des maquettes, des objets tangibles, des contenus virtuels tels que des images, ou plus globalement des versions différentes d'un prototype de l'application tangible.

2.2.2 Les scénarios d'usage

Il est généralement aisé d'accéder aux fonctions constituantes des *propositions instrumentales* formulées en conception lorsqu'elles sont cristallisées dans un matériel, un logiciel, un document rédigé, un plan ou autre. Le dispositif technique qui les rassemble représente d'ailleurs le plus souvent un élément contractuel qui doit être transmissible au client au terme

d'un projet de conception. Pour les modes opératoires prévus, cela peut être plus difficile. En effet, ils renvoient aux anticipations des concepteurs sur les modalités de mise en œuvre des fonctions constituantes par les futurs utilisateurs. Néanmoins, certaines techniques de conception permettent de les relever, comme celles basées sur des *scénarios*. Elles proposent par exemple de tester des prescriptions existantes, ou d'en évaluer de nouvelles, dans une situation de travail donnée.

En conception d'interface homme-machine, la « *conception basée sur des scénarios* », ou *Scenario-Based Design* (Carrol, 2000 ; Rosson & Carrol, 2002), est largement répandue. Elle consiste à décrire comment des utilisateurs accomplissent leurs tâches et à en extraire les éléments caractéristiques afin de rédiger des scénarios d'usage correspondants. Ils sont composés de plusieurs éléments : une configuration de départ, c'est-à-dire un état initial du système homme-machine, des agents ou acteurs, qui ont chacun leurs objectifs, savoirs et savoir-faire ainsi que des outils à disposition, et une séquence d'actions ou d'événements qui mènent à un résultat et qui prennent en compte le contexte social de la situation simulée. Les concepteurs rédigent généralement plusieurs scénarios qui rendent compte de l'utilisation du futur système technique. Ces scénarios permettent alors d'anticiper l'usage qu'en feront les utilisateurs afin de guider la conception avec une vision globale de leurs tâches.

D'autres techniques telles que la *simulation organisationnelle* (Barcellini, Van Belleghem & Daniellou, 2013 ; Daniellou, Le Gal & Promé, 2014) reposent également sur l'utilisation de scénarios. Ils permettent aux concepteurs d'avoir une *approche de l'activité future*, définie par la prévision de l'espace des formes possibles de l'activité future (Daniellou, 2004). Les choix de conception qui en découlent correspondent alors à des modes opératoires compatibles avec des critères tels que la santé, la productivité ou le développement.

Ces deux exemples d'utilisation de scénarios en conception renvoient à l'élaboration conjointe des fonctions constituantes, d'une interface homme-machine ou d'un service, et des modes opératoires prévus. Dans les deux cas, les scénarios rédigés peuvent être vus comme des objets intermédiaires qui peuvent évoluer au fil de la conception. Cependant, leur utilisation ne s'oppose pas à l'innovation, car des nouveautés apparaissent en conception (Béguin & Rabardel, 2000) et ces dernières sont mises au service des besoins des futurs utilisateurs.

Une particularité des travaux de conception présentés dans ce document réside dans l'utilisation par les enseignants de *scénarios pédagogiques* pour planifier et gérer leur activité

d'enseignement (un exemple est donné dans le chapitre 5). Ces derniers ont été mobilisés pour la conception et ils ont fait l'objet de modifications en vue de transformer les pratiques professionnelles des enseignants en intégrant une application tangible. Les versions intermédiaires de ces scénarios peuvent donc rendre compte de l'évolution des représentations sur l'activité future, telle qu'elle est anticipée par les concepteurs, sous la forme d'hypothèses de conception.

Par ailleurs, nous avons vu que ces objets intermédiaires pouvaient être de nature différente selon qu'ils fassent référence aux fonctions constituantes (les caractéristiques d'une application tangible) ou aux modes opératoires prévus (les scénarios pédagogiques). Ces différences doivent être prises en compte dans l'analyse des hypothèses de conception, car elles renvoient à différents aspects de l'activité des enseignants et des élèves médiatisés par le résultat de la conception. La partie suivante traite de cette distinction.

2.2.3 Décomposition du dispositif de formation à concevoir

Nous avons vu que les activités de conception peuvent être vues comme des activités de construction de représentations concernant deux dimensions :

- un artefact technique, dans notre cas une application tangible composée de fonctions constituantes ;
- les usages qui en seront faits au travers des modes opératoires prévus pouvant être appréhendés grâce à des scénarios d'usages.

Cependant, ces deux dimensions apparaissent très générales en l'état. Afin de décomposer un artefact en cours de conception, Couix, (2012) décrit cinq dimensions, adaptées des travaux de Rasmussen (1986) sur les aspects cognitifs de la conception de systèmes d'interaction homme-machine :

- La dimension fonctionnelle décrit ce qu'un utilisateur pourra faire avec l'artefact ;
- La dimension physique décrit les composants de l'artefact en termes de forme, de taille ou de relations ;
- La dimension opérationnelle présente les performances attendues en termes d'efficacité, de fiabilité, de sûreté, etc. ;
- La dimension organisationnelle renvoie à des composantes telles que le nombre d'utilisateurs ou leur formation ;

- La dimension interactionnelle décrit les modalités d'interaction entre l'utilisateur et l'artefact.

Par ailleurs, dans sa synthèse sur l'analyse des besoins en conception, Couix (2012) distingue deux types d'approches : l'ergonomie des systèmes informatiques et des interfaces humain-machine et l'ergonomie des situations de travail. Si le bilan qu'il fait reprend principalement la terminologie de la première, c.-à-d. en termes d'*exigences* et de *spécifications*, il est intéressant de noter que dans la seconde, celles-ci sont nommées *prescriptions faibles* et *fortes* respectivement. La différence vient de l'objet de la conception qui porte alors sur une situation de travail dans son ensemble et notamment sur la tâche à concevoir, par le biais d'une prescription.

La notion de prescription présente un intérêt, car les scénarios pédagogiques s'y rattachent. L'adaptation des scénarios pédagogiques existants correspond en effet à une transformation de la situation de travail actuelle des enseignants et des élèves. Nous proposons donc d'ajouter une dimension prescriptive incluant les dimensions fonctionnelles, organisationnelles et opérationnelles précédemment définies. Elle renverrait alors principalement aux modes opératoires prévus par les concepteurs.

Nous proposons par conséquent de définir trois dimensions pour caractériser l'artefact à concevoir dans notre démarche de conception :

- **La dimension *prescriptive*** concerne les caractéristiques de la tâche relatives à l'exploitation de l'artefact en vue de mettre en œuvre les usages définis par les concepteurs. Il s'agit plus globalement des modalités offertes par les tables interactives et les interactions tangibles pour transformer l'activité d'enseignement existante. Dans notre cas, il s'agit des modifications des scénarios pédagogiques relatives à l'application tangible de simulation. Elles concernent par exemple le déroulement du cours, les consignes, le discours de l'enseignant ou les tâches des élèves, le matériel nécessaire et son articulation avec les tables interactive ou les objets tangibles, ainsi que l'organisation spatiale de la classe avec l'artefact ;
- **La dimension *interactionnelle*** porte sur les modalités d'interaction proposées à un utilisateur. Elle concerne, pour notre démarche de conception, des actions possibles de l'enseignant ou des élèves pour manipuler les objets tangibles ou modifier l'état de l'application tangible de simulation ;

- **La dimension *physique*** renvoie aux composants de l'artefact en termes de formes, de tailles ou de relations entre ces composants. Concernant l'application tangible de simulation, elle porte sur les propriétés physiques des objets tangibles et des images affichées sur l'écran de la table interactive ;

Les dimensions physiques et interactionnelles renvoient à la définition de Fishkin (2004) concernant les interactions dans laquelle il distingue un événement d'entrée (dimension interactionnelle) et un événement de sortie, c'est-à-dire un feedback (dimension physique). La dimension physique renvoie également aux représentations véhiculées par les éléments de l'interface, à destination des utilisateurs. À noter que nous ne prenons pas en compte la troisième partie de la définition de Fishkin concernant les traitements réalisés par le système, c'est-à-dire ce qu'il se passe entre un événement d'entrée et une réponse du système, car ils renvoient au développement logiciel. Celui-ci ne fait pas directement l'objet de spécification en conception participative, car elle porte davantage sur le comportement des éléments de l'interface.

Les dimensions interactionnelle et physique sont, a priori, fortement liées, car les objets tangibles présentent la particularité d'être à la fois des moyens d'action pour l'utilisateur et des vecteurs d'information, notamment de par leur forme. Elles sont cependant différenciées afin de distinguer les manipulations physiques qu'ils proposent et les représentations qu'ils peuvent véhiculer. Elles présentent en effet toutes les deux un intérêt potentiel en situation d'enseignement et d'apprentissage (Manche & O'Malley, 2012).

Ces trois dimensions prennent en compte à la fois les fonctions constituantes et les modes opératoires prévus : au niveau des interactions homme-machine pour les dimensions physique et interactionnelle ; au niveau de la tâche de l'enseignant pour la dimension prescriptive.

2.3 Bilan

Cette partie visait à montrer l'intérêt d'une approche anthropocentrée de la conception impliquant la prise en compte de l'activité des futurs utilisateurs. En conception de TICE, cette approche renvoie, selon nous, à un objet double de l'activité de conception : la définition des fonctions constituantes d'une l'application tangible et des modes opératoires prévus, au travers des scénarios pédagogiques des enseignants.

Nous avons également vu que les objets intermédiaires de la conception peuvent rendre compte de l'évolution de ces deux dimensions du dispositif à concevoir ainsi que des

transformations de l'activité future. Ils s'inscrivent en effet dans une double temporalité passée/future qui renvoie à notre définition des hypothèses de conception. Un choix de conception peut alors porter sur la modification de l'état d'un prototype ou d'un scénario pédagogique, afin de modifier les représentations existantes des concepteurs et de transformer l'activité future.

Afin de différencier ces différents types de choix de conception, nous avons proposé une décomposition des choix de conception selon trois dimensions (prescriptive, interactionnelle et physique), car ils impliquent selon nous des transformations de différents types dans l'activité de l'enseignant ou de l'élève.

L'étude de l'évolution des hypothèses de conception, des objets intermédiaires et des représentations des concepteurs implique de caractériser le processus de conception pour l'analyser longitudinalement. Le chapitre 2 a présenté les démarches de conception participative sans détailler cependant leur déroulement. La partie suivante s'intéresse à la littérature sur le processus de conception en lui-même, en s'intéressant aux effets potentiels du caractère émergent des tables interactives.

3 Conception avec des technologies émergentes

3.1 Un besoin d'apprentissage des technologies émergentes

La dimension novatrice des tables interactives et des interfaces tangibles fait qu'elles sont actuellement peu connues du grand public. Leurs futurs utilisateurs doivent donc passer par une phase d'apprentissage et de développement de leurs compétences et de leurs connaissances afin de face à la nouvelle technologie (Burkhardt, 2010). Ces apprentissages doivent être anticipés par les concepteurs pour favoriser notamment son intégration, son acceptation et son appropriation.

À l'instar des futurs utilisateurs, les concepteurs passent également par une phase d'apprentissage relatif à la technologie émergente. Ils doivent en effet souvent traiter de nouvelles dimensions propres à ce type de technologie (Burkhardt, 2010). Dans le cas des tables interactives et des interfaces tangibles, ces nouvelles dimensions portent par exemple sur les représentations liées aux interactions tangibles (p. ex. les métaphores) et de travail collaboratif autour du dispositif numérique.

Le modèle des TPACK (Koehler & Mishra, 2005), décrit dans le chapitre 2, présente à ce titre un intérêt direct. Il propose en effet de modéliser les connaissances d'un enseignant concernant la *Technologie,* à la fois de façon isolée et en articulation avec ses connaissances sur les *Contenus disciplinaire* et sur la *Pédagogie.*

3.2 Contexte « Technology-push » et ergonomie prospective

En s'inspirant de la dynamique des processus d'innovation, décrits notamment par Nelson (2011), deux types de projets pouvant donner lieu à une démarche de conception se distinguent : les projets de types « Technology-push » et « Market-pull ». Dans les premiers, la conception a pour origine des avancées scientifiques en recherche appliquée. Dans les seconds, elle est instanciée en réponse à un « besoin », plus ou moins bien défini, exprimé par un mandant au regard d'une situation de travail donnée.

Ainsi, pour reformuler les propos de Nelson (2011) sur l'innovation, et en faisant une analogie pour les activités de conception, nous pouvons dire que ces dernières ne font pas toujours suite à un besoin identifié dans une situation donnée. Elles peuvent avoir pour but l'exploration des possibilités de mise en pratique d'une technologie donnée. Dès lors, il est nécessaire d'identifier des besoins potentiels chez des utilisateurs, eux-mêmes parfois potentiels, auxquels la technologie pourrait répondre (Burkhardt, 2010).

Le projet Tactileo peut être caractérisé par cette dimension « *Technology-push* ». Il a en effet vu le jour en réponse à un appel à projets émis par les instances gouvernementales, mais ne résulte pas d'une demande explicite des enseignants ou des élèves directement. L'artefact précède effectivement le besoin et l'un des objectifs du projet était de rechercher des applications qui soient à la fois pertinentes pour les tables interactives et adaptées au milieu éducatif.

En cela, nous nous situons en partie dans le courant de l'ergonomie prospective qui se définit comme « une modalité d'intervention ergonomique qui consiste à anticiper les futurs besoins, usages et comportements ou à construire les futurs besoins en vue de créer des procédés, produits ou services qui leur sont bien adaptés » (Brangier & Robert, 2014, p. 4). L'ergonomie prospective s'intéresse à la spéculation sur un avenir à moyen et long terme encore mal défini. Elle porte une volonté d'innovation et de création explicite et intervient à un niveau macroscopique. D'après ces auteurs, elle se distingue de l'ergonomie de conception qui vise à concevoir des artefacts, les tester et les valider avec une vision sur le court et le moyen terme. L'ergonomie prospective repose sur trois fondements :

- un fondement prospectif : la prospective s'appuie sur des données rétrospectives ou actuelles dans différents domaines afin d'émettre des hypothèses sur l'avenir, anticiper des tendances, élaborer des scénarios futurs, etc. ;
- un fondement créatif : la créativité est définie par la capacité d'un individu ou d'un groupe à imaginer des artefacts novateurs, originaux, inédits, etc. à l'aide de techniques de stimulation des idées créatives ;
- un fondement ergonomique qui inclut tous les acquis de l'ergonomie (concepts, théories, modèles, normes, méthodes, outils, etc.).

Dans ce cadre, les activités de l'ergonome sont tournées vers l'avenir afin d'imaginer des scénarios futurs possibles. À titre d'exemple, Volman (2005) s'est intéressée au futur du numérique dans l'éducation. Il a identifié deux scénarios potentiels : une individualisation du processus d'apprentissage avec le numérique et le développement d'activités d'apprentissage en groupe lors de projets portant sur des problèmes réels. Dans la mesure où le numérique fait référence à un large éventail d'artefacts, les résultats de cette étude doivent être complétés dans le cas des tables interactives.

L'approche défendue par l'ergonomie prospective pour anticiper les usages de tables interactives en amont d'un processus de conception présente un intérêt pour instruire ledit processus. Ces usages anticipés peuvent faire émerger des composantes probables de l'activité future des enseignants et des élèves concernant l'impact des tables interactives, leurs apports ou les limites. L'ergonome pourrait alors en extraire des besoins « prospectifs » afin de guider la conception.

Après cette phase prospective vient logiquement une phase de conception effective. Dans l'approche de l'ergonomie prospective, l'anticipation des besoins apparaît centrale. Par conséquent, en conception sur technologie émergente, l'analyse des besoins doit l'être également. La partie suivante s'y intéresse. Elle met en avant la complexité de cette analyse, en particulier à cause de l'évolution des besoins liée à l'évolution de la technologie émergente elle-même.

3.3 Analyse des besoins avec une technologie émergente

Les *besoins* en conception ont des définitions différentes selon les champs disciplinaires (Couix, 2012 ; Loup-Escande, 2010). En ingénierie de conception par exemple, les besoins sont vus comme l'expression d'une volonté relative au futur par un mandant. En ergonomie

de conception des systèmes informatiques, les besoins permettent de construire et de justifier les fonctionnalités, les propriétés et les caractéristiques du futur système (Burkhardt & Sperandio, 2004 ; Chapanis, 1996). Couix (2012) les assimile notamment aux repères descriptifs pour la conception en ergonomie des situations de travail (Daniellou, 2004). En conception sur technologies émergentes, les besoins peuvent avoir le sens *d'attentes* vis-à-vis de la technologie. En effet, ces dernières répondent rarement à des besoins « conscients », c'est-à-dire explicitement formulés (Robertson, 2001), mais plutôt à des *attentes* « latentes » (Sperandio, 2001) ou créent directement des besoins.

L'intérêt de l'analyse des besoins, au sens d'attentes, a notamment été décrit par Anastassova (2006) dans le cas des technologies émergentes. Il en ressort qu'une identification précise des besoins favoriserait notamment :

- une délimitation plus précise des objectifs de la conception (Nielsen, 1993)
- une qualité accrue des systèmes conçus, du fait du fait d'une meilleure adéquation aux attentes des utilisateurs et une meilleure acceptabilité (Damodaran, 1996) ;
- une meilleure compréhension et une meilleure coordination entre tous les acteurs impliqués dans le projet de conception ;
- une meilleure compréhension du système par les utilisateurs et donc une utilisation plus effective ;

Anastassova (2006, p. 51) déplore cependant que « *la grande majorité des interventions ergonomiques sur des technologies émergentes se limitent à des évaluations plus ou moins formelles des prototypes conçus et n'incluent pas une analyse fine des besoins lors des phases amont de la conception* ». Par conséquent, les besoins sont mal cernés vis-à-vis de ce type de technologie et le développement d'applications repose généralement sur des analyses superficielles des besoins, lorsqu'analyses il y a (Burkhardt, 2010).

En outre, ces besoins évoluent dans le temps et peuvent être difficiles à intégrer lorsque le processus de conception est avancé (Lindgaard, Dillon, Trbovich & al. 2006). Une difficulté récurrente avec une technologie classique est alors de déterminer quand doit s'arrêter l'analyse des besoins. Dans le cas d'une technologie émergente, cette dynamique des besoins représente également une force pour faire avancer les développements techniques. En effet, l'ergonome en conception avec ce type de technologie doit articuler deux objectifs (Burkhardt, 2010) jusqu'à trouver un compromis entre :

- Prendre en compte les besoins des utilisateurs et améliorer les conditions de leur activité ;
- Contribuer à explorer les potentialités et à minorer les limites de ces technologies.

D'après Burkhardt (2010), une technologie émergente, en tant qu'artefact sociotechnique, est en évolution et en recherche d'applications et d'usages relatifs à des besoins. Cette recherche a le double objectif d'accompagner le développement et l'innovation de la technologie émergente et de justifier de la pertinence et de la valeur de cette dernière. D'un autre côté, d'après Anastassova (2006, p. 50), dans le cas de technologies émergentes, « *le besoin peut n'apparaître et s'intensifier qu'après un développement suffisant de la technologie (c'est même généralement le cas)* ». Ainsi, technologie émergente et besoins des utilisateurs semblent évoluer en parallèle au cours de l'activité de conception.

Avec une technologie « *classique* », les possibilités et limites aux niveaux technique et interactionnel sont connues des concepteurs, voire des futurs utilisateurs, et relativement stabilisées. Dans ce type de situation de conception, les ergonomes sont confrontés au paradoxe de l'ergonomie de conception (Theureau & Pinsky, 1984, p. 10). Celui-ci peut être formulé comme suit : « *pour dire quelque chose de réellement fondé sur une situation de travail, il faut attendre qu'elle soit complètement conçue, mais alors il est trop tard pour intervenir dans la conception* ». Avec une technologie émergente en cours d'évolution, ce paradoxe apparaît donc amplifié par la difficulté d'anticiper comment la technologie elle-même évoluera.

Face à ces difficultés, Loup-Escande (2010) offre des éléments de réponse par la mise en œuvre de démarches de conception itératives et centrées utilisateur. L'auteure soutient qu'il « *n'est pas rare que l'analyse des besoins soit menée simultanément à la spécification voire à la réalisation détaillée plutôt que dans la phase amont du projet* » (p. 53). Ainsi, en reprenant le constat de Burkhardt & Sperandio (2004) d'un enchaînement des phases d'évaluation et d'identification de besoins au fil du raffinement de ces derniers, l'auteure situe l'analyse des besoins à différents moments plus ou moins avancés de la conception. Cela permet l'évolution conjointe des besoins et de la technologie émergente en développement, ainsi que la recherche de compromis entre ces deux dimensions par l'ergonome.

Anastassova (2006) semble partager ce point de vue en ce qu'elle propose d'utiliser des maquettes, des prototypes ou diverses techniques inspirées de scénarios pour l'analyse des besoins. Or ces techniques nécessitent un certain avancement de la conception, en particulier le recours à un prototype. L'auteure suggère par ailleurs de prendre en compte l'évolution des

besoins en adoptant une démarche itérative pour proposer des solutions en conception et les tester afin de faire émerger de nouveaux besoins (Brangier & Bastien, 2006).

3.4 Bilan sur le processus de conception sur technologie émergente

Cette partie a mis en avant la nécessité de former les concepteurs aux spécificités des tables interactives et des interactions tangibles. Le modèle des TPACK pourrait être mobilisé pour étudier les formes d'apprentissages relatives à ces technologies.

De nombreuses interventions ergonomiques ont porté sur l'évaluation des produits de processus de conception sur technologie émergente. Pour les tables interactives ou les interfaces tangibles seules, nous pouvons citer par exemple Salehi & al. (2014), Kubicky & al. (2011) ou Cuendet, Jerman & Dillenbourg (2012). Nous avons également vu qu'il existait dans la littérature des travaux sur l'analyse des besoins avec des technologies émergentes (p. ex. Anastassova, 2006 ; Loup-Escande, 2010 ; Burkhardt, 2010). Ces travaux préconisent la mise en œuvre de démarches de conception itératives et centrées utilisateur pour favoriser l'évolution de la technologie et des besoins. À noter cependant que dans le cas d'un projet de type « *Technology-push* », ces besoins peuvent être analysés de façon prospective pour initier la conception.

D'après les différentes définitions de besoins existantes et de leurs contextes d'émergence ou d'analyse, il est nécessaire de nous situer plus précisément d'un point de vue terminologique. En effet, des besoins généraux correspondant aux attentes vis-à-vis d'une technologie émergente ne sont pas de même nature que des besoins plus concrets relevés lors de la confrontation de concepteurs avec un prototype. Pour reprendre la terminologie de Visser (2009) concernant les représentations, ces deux exemples peuvent renvoyer à des *générations*, mais les représentations associées diffèrent. La partie suivante tente d'alimenter ce type de distinction à partir d'éléments théoriques concernant des activités de conception avec des technologies plus classiques.

4 Conception centrée utilisateur et co-conception

Cette partie vise également à rendre compte des grandes étapes en conception, en plus de la phase d'analyse des besoins, afin d'outiller l'étude longitudinale de notre activité de conception. On trouve en effet peu d'études sur les étapes intermédiaires entre l'analyse des

besoins et l'évaluation du résultat final dans des activités de conception sur technologie émergente : p. ex. la définition des exigences et des spécifications de l'artefact, les phases de confrontation avec des maquettages ou des prototypes sur la technologie émergente, ou en simulations, etc. Elle s'appuie en particulier sur les approches en conception centrée utilisateur et en co-conception pour leur compatibilité vis-à-vis des démarches de conception participatives.

4.1 La conception centrée utilisateur

La norme ISO 9241 définit la conception centrée sur l'opérateur humain, également appelée conception centrée utilisateur, comme « une manière de concevoir les systèmes interactifs, ayant pour objet de rendre les systèmes utilisables et utiles en se concentrant sur les utilisateurs, leurs besoins et leurs exigences, et en appliquant les facteurs humains, l'ergonomie et les connaissances et techniques existantes en matière d'utilisabilité. Cette approche favorise l'efficacité et l'efficience, améliore le bien-être de l'homme, ainsi que la satisfaction des utilisateurs, l'accessibilité et la durabilité, et réduit les effets nuisibles potentiels de leur utilisation sur la santé, la sécurité et les performances. »

Elle définit 5 critères d'application et de mise en œuvre de la démarche :

- La prise en compte en amont des utilisateurs, de leurs tâches et de leur environnement ;
- La participation active des utilisateurs, garantissant la fidélité des besoins et des exigences liées à leurs tâches ;
- La répartition appropriée des fonctions entre les utilisateurs et la technologie ;
- L'itération des solutions de conception, jusqu'à satisfaction des besoins et des exigences exprimés par les utilisateurs ;
- L'intervention d'une équipe de conception multidisciplinaire, visant une expérience utilisateur optimale.

La conception centrée utilisateur est par définition une activité de conception collective, car elle implique des acteurs de différentes disciplines, mais elle parfois critiquée lorsque les relations entre utilisateurs et concepteurs restent limitées (Jean-Daubias, 2004). En effet, malgré les critères assurant l'implication des utilisateurs dans la conception, il arrive qu'ils ne participent pas directement aux prises de décision en conception et qu'ils aient davantage une fonction informative ou consultative (Damodaran, 1996).

En outre, une démarche de conception participative peut être vue comme une approche de conception centrée utilisateur sous réserve qu'elle réponde à ses critères.

D'après la norme ISO 13407, les activités de conception centrée utilisateur sont itératives et le cycle est répété jusqu'à obtention d'une solution satisfaisante au regard des objectifs des concepteurs, p. ex. l'utilisabilité (Maguire, 2001). La figure 9 décrit les différentes étapes sont les suivantes, à savoir :

- Planifier le processus de conception centrée utilisateur ;
- Comprendre et spécifier le contexte d'utilisation ;
- Spécifier les besoins organisationnels et ceux des utilisateurs ;
- Produire des solutions de conception et des prototypes ;
- Évaluer ces solutions au regard des besoins initiaux.

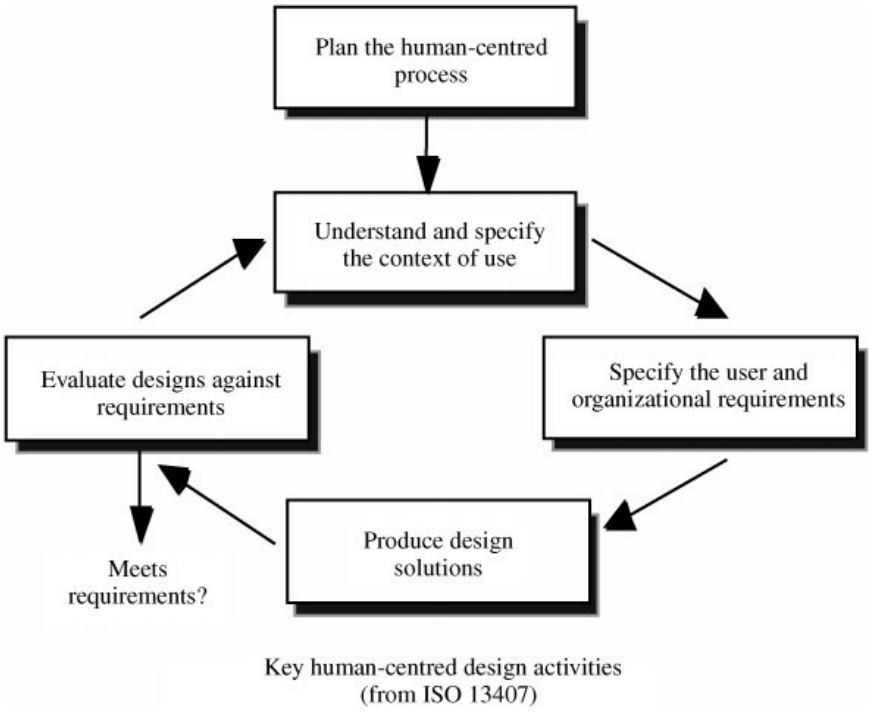


Figure 9. Cycle de conception centrée utilisateur

Ainsi, le cycle de conception décrit dans la figure ci-dessus rend bien compte des itérations qui semblent nécessaires en conception sur technologie émergente. La démarche de conception pourrait donc s'inspirer de cette approche.

4.2 La co-conception

On distingue trois grandes formes de participation des ergonomes aux projets de conception (Couix, 2012) : l'approche Human Factors, l'assistance à maîtrise d'ouvrage et la co-conception.

Dans l'approche Human Factors, le rôle de l'ergonome est de produire des connaissances scientifiques sur l'homme au travail et de les synthétiser dans des manuels ou sous forme de recommandations ergonomiques utilisables par les concepteurs. L'ergonome n'intervient alors pas toujours directement dans la conception, ce qui peut présenter des limites, notamment pour que les concepteurs s'approprient les nombreuses recommandations disponibles dans la littérature (Chapanis, 1996).

En assistance à maîtrise d'ouvrage, les ergonomes interviennent en tant qu'intermédiaires entre concepteurs et utilisateurs futurs. Ils cherchent à assurer une meilleure prise en compte des conditions de travail réel dans la solution future afin d'enrichir les objectifs de la conception et d'identifier les contraintes à prendre en compte (Bourmaud, 2006 ; Daniellou, 2004). Daniellou & Naël (1995) décrivent trois grandes tâches de l'ergonome en assistance à maîtrise d'ouvrage :

- L'enrichissement des objectifs du projet à partir de l'étude de situations de références ;
- La formulation de repères prescriptifs pour la conception sous forme de recommandations notamment ;
- La simulation de l'activité future à partir de scénarios et avec de futurs utilisateurs.

Enfin, en co-conception, l'ergonome est impliqué au même titre que les autres concepteurs dans la maîtrise d'œuvre (Darses & De Montmollin, 2006). La principale différence avec l'assistance à maîtrise d'ouvrage réside dans la plus grande implication des ergonomes dans la définition des spécifications. Pour ces deux types de démarche, Chapanis (1996) propose une décomposition en 5 étapes :

- Définir avec le mandant le besoin initial ;
- Établir la liste des exigences, c'est-à-dire ce que le système devra faire et ses principales propriétés, sur le plan fonctionnel, opérationnel et physique ;
- Définir les fonctions, l'utilisation, le comportement et l'architecture de l'interface du système ;

- Spécifier précisément l'interface du système ;
- Simuler et évaluer l'utilisation du dispositif.

En conception sur technologie émergente, la co-conception présente un intérêt fort pour le rôle qu'elle offre aux ergonomes dans la spécification de l'interface. En effet, cela permettrait, selon nous, de prendre concrètement en compte les besoins émergeant au fil de la conception et de les articuler avec l'avancement des modes opératoires au niveau de l'interface. Étant donné le rôle des représentations dans une interface tangible, il est d'autant plus pertinent de demander aux ergonomes de la spécifier puisqu'ils sont en lien direct avec les futurs utilisateurs. En allant plus loin, il serait même intéressant d'y impliquer ces derniers.

4.3 L'analyse des besoins en co-conception

Dans cette partie, nous reprenons les travaux de Couix (2012) sur l'analyse des besoins en projet de conception et de la synthèse qu'il en fait en comparant la conception de systèmes de travail (Daniellou, 2004) et la conception de systèmes interactifs (Chapanis, 1996 ; Maguire, 2001).

Tout d'abord, les concepteurs partent d'une demande qu'ils doivent s'approprier et reformuler. Ils recueillent ensuite les besoins et les exigences de l'ensemble des parties prenantes, dont les utilisateurs finaux. L'auteur distingue les exigences, qui peuvent être directement recueillies en l'état, des besoins, qui doivent être identifiés avant d'être reformulés en exigences. Enfin les exigences sont filtrées et, pour celles retenues, traduites en spécifications par les concepteurs. La figure 10 (Couix, 2012) décrit ce processus.

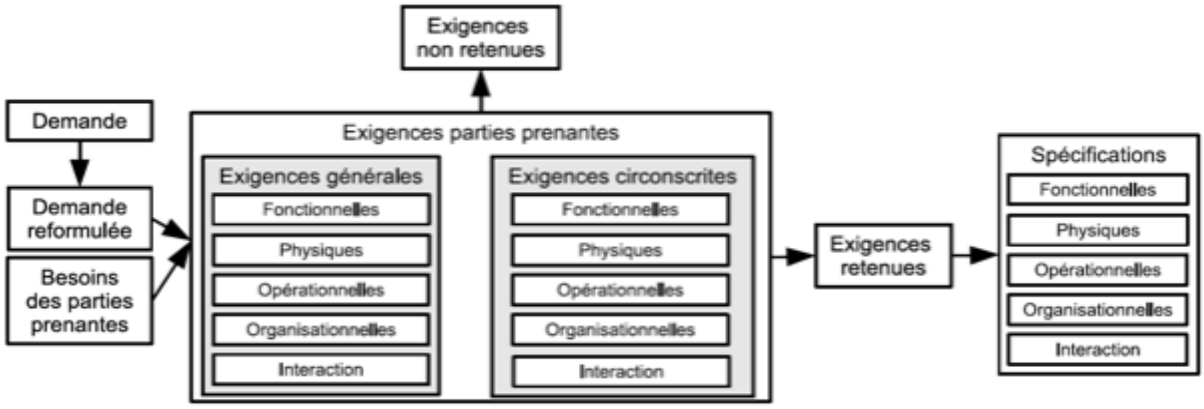


Figure 10. Synthèse du processus d'analyse des besoins (Couix, 2012, p. 31)

Comme nous l'avons vu, les besoins sont rarement exprimés en tant que tels par les utilisateurs futurs qui émettent plutôt des attentes vis-à-vis du futur système. L'ergonome doit alors identifier les besoins sous-jacents à ces attentes « latentes » (Sperandio, 2001). Pour cela, il peut mobiliser des connaissances scientifiques issues de la littérature en ergonomie (Lamonde, 2004) ainsi que les bibliothèques de situations qu'il a construites au fil de ses interventions (Daniellou, 2004). Il peut également mener une analyse du travail réel dans des situations de référence afin d'en identifier les éléments constitutifs des besoins suivants (Couix, 2012) :

- Les caractéristiques organisationnelles, techniques ou physiques afin de repérer par exemple les contraintes qui s'appliqueront au futur système ou les tâches prescrites ;
- Les éléments structurants de l'activité des utilisateurs tels que leurs objectifs, leurs ressources, leurs modes opératoires et les difficultés rencontrées, et qui représentent des éléments à conserver dans la situation future ou à prendre en compte dans la conception ;
- Les caractéristiques physiques et cognitives des futurs utilisateurs afin de prendre en compte leurs connaissances, leurs compétences et leurs expériences.

Les exigences correspondent aux réponses à ces besoins et décrivent ce que le système ou l'artefact devra faire. À partir des exigences retenues, les spécifications de l'artefact à concevoir sont définies à un niveau suffisamment détaillé pour permettre son implémentation, p. ex. matérielle ou logicielle, sous la forme de solutions de conception. Elles sont ensuite évaluées afin de valider les choix de conception au regard des besoins reformulés et des exigences retenues ou alors de reboucler sur des étapes antérieures afin d'améliorer les solutions si besoin.

La description du processus de conception (figure 10) ne rend pas compte de la réalisation et de l'évaluation des solutions de conception, car elle est centrée sur l'analyse de besoins. Dans la pratique (Simon, 1999) des itérations apparaissent au sein d'une même étape ou entre certaines d'entre elles. En effet, pour reprendre la métaphore de Schön (1992), les concepteurs dialoguent avec la situation : celle-ci réagit à leurs actions et apporte de nouvelles informations qui contribuent à la compréhension et à la résolution du problème de conception, ce qui induit des retours en arrière ou des remises en question des choix de conception.

4.4 Bilan et choix terminologiques

Cette partie a permis de présenter des éléments théoriques, c'est à dire des modèles et des définitions, pour caractériser une démarche de conception dans son ensemble. Elle permet de poser les définitions suivantes pour la suite de ce document concernant les besoins, les attentes, les exigences et les spécifications. Ces définitions ont été adaptées à notre contexte de conception sur technologie émergente dont les spécificités ont été décrites précédemment.

Les *besoins* permettent de justifier ce que devra faire la technologie émergente. Ils portent sur (Couix, 2012) :

- Les caractéristiques organisationnelles, techniques ou physiques afin de repérer par exemple les contraintes qui s'appliqueront au futur système ou les tâches prescrites ;
- Les éléments structurants de l'activité des utilisateurs tels que leurs objectifs, leurs ressources, leurs modes opératoires et les difficultés rencontrées, et qui représentent des éléments à conserver dans la situation future ou à prendre en compte dans la conception ;
- Les caractéristiques physiques et cognitives des futurs utilisateurs afin de prendre en compte leurs connaissances, leurs compétences et leurs expériences.

Les besoins ne sont pas nécessairement exprimables par les futurs utilisateurs et doivent être inférés par les ergonomes.

Les *attentes* découlent des besoins et renvoient aux souhaits des futurs utilisateurs vis-à-vis de la technologie émergente. Certaines attentes peuvent être « latentes » (Sperandio, 2001) et émerger au cours de la conception sur une technologie émergente. Le recours à un processus itératif mettant en jeu différentes versions des maquettes et d'un prototype peut favoriser ces émergences. Cette distinction entre besoins et attentes implique que ces dernières doivent émerger tout au long de la conception, et non les besoins.

Les *exigences* décrivent les propriétés de la technologie émergente ou ce qu'elle devra faire pour répondre aux attentes des futurs utilisateurs. Elles peuvent porter sur tout ou partie du système et ne présentent pas un niveau de détail suffisant pour être implémentée directement dans une solution (p. ex. un prototype).

Les *spécifications* décrivent la solution technique de sorte qu'elle puisse répondre aux exigences. Elles renvoient aux mêmes dimensions que les exigences, mais sont censées être suffisamment détaillées pour être comprises et exploitées par les concepteurs techniques, tels que des développeurs informatiques.

Ces définitions renvoient à différents types de choix de conception dans le processus de conception global. Ils permettront de le décomposer en les articulant avec les objectifs des étapes des modèles décrits dans cette partie. Chaque *phase* correspondrait alors à un ensemble de classes de situations (Bourmaud, 2006) en conception présentant une homogénéité en termes de caractéristiques des choix de conception, d'objectifs des concepteurs ou de techniques utilisées. Une représentation par *phases* constituerait ainsi une grille d'analyse qui pourrait rendre compte du caractère non linéaire des activités de conception. Cela permettrait à la fois d'outiller notre étude longitudinale des hypothèses de conception en s'intéressant aux objectifs des concepteurs lorsqu'ils les formulent.

5 Conclusion

Ce chapitre a décrit les technologies émergentes mobilisées dans la démarche de conception, c'est à dire des interfaces tangibles sur table interactive. Certaines caractéristiques, par exemple les modalités de représentation de l'information ou la possibilité d'interagir à plusieurs autour d'une table interactive, sont apparues prometteuses pour des activités d'enseignement et d'apprentissage. Cependant, les modalités de développement des activités d'enseignement et d'apprentissage peuvent difficilement être anticipées d'après la littérature. Il serait donc intéressant d'analyser ces développements potentiels par le biais des hypothèses de conception.

Au regard des difficultés actuelles d'introduction des TICE (p. ex. Artigues, 1998 ; Karsenti, Peraya & Viens, 2002), l'activité de conception devrait porter sur l'activité d'enseignement médiatisée par l'application tangible. Ainsi, plutôt que de définir uniquement les caractéristiques de cette dernière, les scénarios pédagogiques habituellement utilisés par les enseignants devraient être adaptés pour l'intégrer. Cela permettra notamment de prévoir les *modes opératoires* des enseignants vis-à-vis des *fonctions constituantes* de l'application tangible. L'étude de la construction conjointe de ce couple permettra de rendre compte des transformations anticipées dans les pratiques enseignantes et de leur évolution, notamment grâce aux objets intermédiaires.

Cette distinction entre fonctions constituantes et modes opératoires prévus, inspirée de l'approche instrumentale (Rabardel, 1995), nous a ensuite conduits à considérer différents niveaux d'abstractions dans lesquels les concepteurs construisent des représentations. Trois

dimensions de l'artefact à concevoir ont été définies : *prescriptive*, *interactionnelle* et *physique.* Ces dimensions renvoient aux fonctions constituantes et aux modes opératoires prévus à différents niveaux de granularité en tenant compte des spécificités des tables interactives et des interactions tangibles.

Par ailleurs, les modèles sur les démarches de conception, p. ex. la conception centrée utilisateur, formalisent, en quelques étapes, le déroulement type d'un projet de conception (p. ex. Chapanis, 1996 ; Maguire, 2001). À partir de ces étapes, des types de choix de conception (attente, exigence ou spécification) et du contexte effectif de la démarche de conception mise en œuvre (objectifs, techniques, supports, etc.) des phases devraient pouvoir être identifiées. Ces phases de la conception devraient correspondre à des classes de situation en conception indépendamment de son déroulement temporel pour rendre compte de son caractère non linéaire. Elles devraient également rendre compte de l'avancement de la technologie émergente en parallèle des attentes des participants.

Deuxième partie : Problématique

Chapitre 4 PROBLEMATIQUE

1 Mise en lumière des processus d'intégration et d'innovation en conception

Le contexte de cette thèse en ergonomie de conception présente deux grandes spécificités : d'une part la nature des activités concernées, des activités d'enseignement et d'apprentissage, et d'autre part la conception avec des technologies émergentes.

Les formes de développement possibles de l'activité des enseignants et des élèves sont a priori très variées en conception de TICE, selon les disciplines et les technologies mobilisées. Cependant, l'amélioration effective de cette activité repose en grande partie sur l'adaptation des dispositifs conçus aux pratiques professionnelles de référence des enseignants. Par conséquent, les TICE donnent lieu à un paradoxe actuel dans le monde de l'enseignement : elles rencontrent des difficultés d'intégration dans les activités d'enseignement et d'apprentissage, tout en étant des sources potentielles de développement pour ces activités (Artigues, 2013 ; Baron & Bruillard, 2008 ; Bruillard, 2011 ; Hoyle & Lagrange, 2009 ; Karsenti & Fievez, 2013).

Dans notre cas, ce paradoxe est amplifié par les caractéristiques des tables interactives. En effet, les activités de conception avec des technologies émergentes impliquent la construction d'un compromis entre potentiel technologique et besoins des futurs utilisateurs en conception sur technologie émergente (Burkhardt, 2010). De plus, bien qu'elles présentent des caractéristiques singulières et novatrices, dans les usages ou les modalités d'interaction qu'elles proposent, leurs apports potentiels sont difficiles à anticiper en raison du caractère peu connu et peu mature de ces technologies. Par conséquent, leur pertinence et leur intérêt restent à explorer et à démontrer dans de nombreux domaines, y compris en situation d'enseignement.

En résumé, deux grands types de processus en conception émergent relativement à l'adaptation des résultats de la conception aux situations dans lesquelles ils seront introduits et aux améliorations qu'ils rendront possibles. Nous les nommerons *processus d'intégration* et

processus d'innovation. Les notions d'intégration et d'innovation étant utilisées dans différents domaines, nous posons les définitions ci-dessous pour les besoins de notre étude.

L'intégration du dispositif d'enseignement correspond à l'adaptation entre les résultats de la conception et les situations d'enseignement dans lesquelles ils seront déployés. Ils doivent pour cela tenir compte des caractéristiques de l'activité des futurs utilisateurs, c.-à-d. les enseignants et les élèves. Il peut s'agir par exemple de leurs objectifs, de leurs contraintes, des prescriptions existantes, du déroulement habituel du cours ou des contenus à enseigner.

L'innovation dans les pratiques d'enseignement avec des tables interactives renvoie aux transformations porteuses d'améliorations, c.-à-d. les plus-values, par rapport à une activité existante. Elle s'appuie sur le potentiel des nouvelles technologies, c.-à-d. les tables interactives et les objets tangibles, pour proposer de nouvelles modalités d'enseignement et d'apprentissage. Celles-ci peuvent porter sur des tâches difficilement réalisables jusque-là, sur de nouveaux contenus ou nouvelles formes de représentation des notions à aborder, sur la diversification des ressources à disposition des enseignants, ou sur de nouvelles modalités de gestion de la classe.

2 Liens potentiels entre méthodes de conception et processus d'intégration/innovation

Les chapitres théoriques ont présenté des éléments méthodologiques concernant les activités de conception relatives aux situations d'enseignement et d'apprentissage et aux technologies émergentes. Nous nous intéresserons aux méthodes de conception suivantes, car elles pourraient influer les processus d'intégration/innovation :

- la construction conjointe du système technique et des pratiques enseignantes ;
- l'implication de participants en conception ;
- la confrontation des hypothèses de conception ;
- le cadrage du champ des possibles.

Ces quatre méthodes sont généralement liées dans les activités de conception, comme l'illustrent les exemples de méthodes de conception suivants. Les démarches de *conception centrée utilisateur* impliquent la spécification du contexte d'utilisation, la participation de

futurs utilisateurs et des itérations sur les solutions de conception (c.-à-d. leur confrontation), mais elles peuvent être centrées davantage sur le système technique que sur l'activité (Maguire, 2001). Les activités de conception participatives favorisent l'identification des besoins et l'anticipation des usages (Bourmaud, 2006). En revanche, elles n'induisent pas toujours de co-construire les usages et l'artefact technique ou de confronter les versions intermédiaires de celui-ci. Le modèle de la boucle de la conception de Rabardel (1995) traite de la définition des fonctions constituantes d'un système technique et des modes opératoires prévus des utilisateurs. De plus, il induit des phases de confrontation par l'usage, pour favoriser l'apparition de genèses instrumentales, en faisant mobilisant également des utilisateurs potentiels. L'approche *Design-Based Research* (Brown, 1992 ; Collins, 1990) sollicite des enseignants en petit nombre afin de confronter les résultats d'une activité de conception en situation réelle. Cependant, elle n'implique pas nécessairement d'outil numérique.

Les parties suivantes décrivent en quoi chaque méthode peut favoriser les processus d'intégration/innovation en conception.

2.1 La construction conjointe du système technique et des pratiques enseignantes

Nous avons souligné l'intérêt de considérer en conception à la fois les caractéristiques d'un artefact en cours d'élaboration et l'activité future dans laquelle il doit être introduit (Béguin, 2013). Un parallèle peut être fait avec l'approche instrumentale et les notions de fonctions constituantes et de modes opératoires prévus définis par des concepteurs (Rabardel, 1995).

Or les enseignants peuvent utiliser des scénarios pédagogiques pour guider leur activité d'enseignement (Musial & al., 2011 ; Pernin & Lejeune, 2004). Ces formes d'auto-prescription cristallisent les pratiques des enseignants et renvoient, selon nous, à la notion de mode opératoire. Elles peuvent par conséquent faire l'objet d'une élaboration, ou d'une réélaboration, en conception, tout en guidant le développement du système technique (p. ex. *Scenario-Based Design*, Carrol, 2000).

De plus, les tables interactives renvoient à un large éventail d'usages et de modalités d'interactions possibles (p. ex. Scott & al., 2003 ; Benko & al., 2009 ; Chaboissier, 2011). En particulier, les différentes formes de représentation de l'information qu'elles offrent, grâce

aux interactions tangibles, présentent a priori un intérêt pour des activités d'enseignement et d'apprentissage (Manches & O'Malley, 2012).

Dès lors, la définition des caractéristiques de la technologie en parallèle de celle des scénarios pédagogiques serait triplement intéressante pour articuler intégration et innovation.

- En premier lieu, la définition des scénarios pédagogiques pourrait orienter les usages des tables interactives afin de les intégrer aux activités en classe et ainsi, impacter la définition des caractéristiques de l'application technique.
- Par ailleurs, les caractéristiques singulières des tables interactives pourraient offrir de nouvelles possibilités dans les pratiques d'enseignement en termes, par exemple, de contenus à aborder, de tâches d'apprentissage ou de gestion de la classe.
- Inversement, ces mêmes caractéristiques pourraient également impacter l'activité future des enseignants et des élèves. Elles induiraient alors des modifications de leurs pratiques pour intégrer l'artefact technique conçu dans les activités en classe.

2.2 L'implication de participants en conception

Les démarches de conception participatives présentent plusieurs caractéristiques générales intéressantes pour notre problématique. Elles favorisent les apprentissages chez les concepteurs et les futurs utilisateurs : p. ex. des apprentissages mutuels (Ehn, 1998 ; Béguin, 2003 ; Barcellini, 2015) ou des apprentissages incidents relatifs à la dimension constructive de l'activité de conception (Samurçay & Rabardel, 2004). Ces apprentissages sont intéressants pour un projet de conception « technology-push » (Nelson, 2011) sur technologie émergente telle qu'une table interactive. En effet, les futurs utilisateurs ont a priori peu de connaissances sur son fonctionnement ou ses usages. Leur participation en conception pourrait avoir comme premier effet de les former à la technologie pour les aider à se construire une représentation des possibilités offertes par les tables interactives. Ils pourraient par la suite devenir force de proposition en exploitant ses caractéristiques innovantes lors de la conception de l'artefact technique.

Par ailleurs, nous avons vu que la formation des enseignants pouvait favoriser l'intégration du numérique dans leurs pratiques (Elliot, Livengood & McGlamery, 2012 ; Assude & Emprin, 2013). Or, compte tenu des formes d'apprentissages en conception, celles-ci peuvent participer à la formation d'enseignants concepteurs (Sanchez & Monod-Ansaldi, 2015). Ainsi, elles peuvent leur permettre d'articuler différents types de connaissances sur leur pratique et

sur les tables interactives (cf. le modèle des TPACK [Mishra & Koehler, 2006] et l'approche *Learning by design* [Brown & Campione, 1996]). Dès lors, cette articulation devrait favoriser l'intégration des tables interactives en classes par la construction de connaissances relatives à des modes opératoires adaptés. D'un autre côté, solliciter quelques enseignants pionniers dans le cadre d'une démarche itérative leur permettrait de construire de nouvelles connaissances et de nouveaux savoir-faire vis-à-vis des tables interactives afin d'innover dans leurs pratiques d'enseignement (cf. l'approche *Design-Based Research* [Brown, 1992 ; Collins, 1990]).

En outre l'implication de futurs utilisateurs leur donne la possibilité d'intervenir directement sur le processus de conception et donc sur la transformation de leur activité, en particulier en situation de co-conception. Impliquer des enseignants en conception pourrait donc leur permettre d'alimenter la conception à partir de leurs besoins pour favoriser l'intégration de la solution technique dans l'activité future.

2.3 La confrontation des hypothèses de conception

La confrontation des hypothèses de conception permet de les valider, de les rejeter ou de les remettre en mouvement afin d'optimiser le compromis entre innovation et intégration. Les objets intermédiaires (Mer, Jeantet & Tichkiewitch, 1995) rendent possible certaines formes de confrontation, notamment grâce à des maquettes (« basse fidélité ») ou des prototypes (« haute fidélité ») et par leur mise en œuvre en simulation ou en situation réelle.

En conception de TICE, la mise en œuvre des résultats de la conception en classe (p. ex. l'approche *Design-Based Research)*, la simulation et les itérations sur des prototypes fonctionnels peuvent alimenter le processus de conception. Ces formes de confrontations permettraient ainsi d'anticiper l'intégration du système technique, par rapport aux pratiques d'enseignement existantes et futures, en se référant aux besoins des enseignants comme critères d'évaluation des solutions de conception. Inversement, elles devraient aussi favoriser l'ajustement des pratiques d'enseignement existantes par rapport aux solutions de conception en vue d'atteindre un compromis entre intégration du système technique et adaptation des modes opératoires prévus.

Par ailleurs, les tables interactives et les interactions tangibles étant peu connues, les phases de confrontation de solutions intermédiaires peuvent favoriser l'explicitation de leurs propriétés techniques et interactionnelles. Les concepteurs devraient alors étoffer leurs représentations (Visser, 2009) du potentiel technique des tables interactives afin de mieux les exploiter en conception.

De plus, une technologie émergente, peu mature par définition, continue à se développer en conception, à la recherche d'usages et d'applications (Burkhardt, 2010). La confrontation des objets intermédiaires peut alors faire émerger de nouvelles formes d'usage non anticipé ou connu des concepteurs, par exemple grâce aux genèses instrumentales (Rabardel, 1995) en situation réelle (cf. conception dans l'usage [Folcher, 2003]).

2.4 Le cadrage du champ des possibles

Les activités de conception peuvent être vues comme des activités de résolution de problèmes mal définis (Simon, 1973), complexes, opportunistes, mal structurés (Visser, 2009). Il est nécessaire de prévoir l'espace des formes possibles de l'activité future (Daniellou, 2007). Il peut alors être intéressant de cadrer le champ des possibles en identifiant des « maxima » d'intégration et d'innovation des résultats de la conception.

Pour rappel, nous avons défini les besoins comme faisant référence aux caractéristiques organisationnelles, techniques ou physiques de l'activité des futurs utilisateurs, à ses éléments structurants, tels que les ressources et les contraintes, et que les caractéristiques des futurs utilisateurs (enseignants et élèves). Nous faisons le postulat qu'une solution de conception répondant à l'ensemble de ces besoins devrait optimiser ses chances d'être intégrées dans leur activité future. Par conséquent, l'analyse des besoins des futurs utilisateurs et leur mobilisation en conception devraient favoriser l'intégration de l'application tangible dans l'activité future des enseignants et des élèves. De façon similaire, ces besoins devraient soutenir l'adaptation des pratiques d'enseignement existantes. Ils rendent en effet compte à la fois des invariants des activités d'enseignement et d'apprentissage à conserver et des marges de manœuvre disponibles en conception. Par ailleurs, ils devraient mettre en avant des pistes d'amélioration possible par rapport aux difficultés et aux limites rencontrées par les enseignants et les élèves.

D'autre part, le cadre de l'ergonomie prospective (Brangier & Robert 2014) présente un intérêt pour son fondement créatif qui permet notamment de s'affranchir des questions d'intégrations des tables interactives. Cette approche peut donc favoriser l'identification du potentiel de ces technologies émergentes et favoriser leur exploitation par les concepteurs. De là, ils devraient pouvoir anticiper des usages exploitant le potentiel de la technologie émergente afin d'orienter la conception en proposant des innovations potentiellement pertinentes dans l'activité d'enseignement médiatisée par des tables interactives.

3 Questions de recherche

Les méthodes de conception que nous avons décrites interviennent a priori de multiples façons sur l'intégration et l'innovation en conception, qui peuvent porter sur :

- L'adaptation du système technique aux pratiques d'enseignement ;
- L'adaptation de ces pratiques aux caractéristiques des tables interactives ;
- L'amélioration des pratiques d'enseignement ;
- L'exploitation des caractéristiques innovantes des tables interactives.

Outre l'articulation entre intégration et innovation, on retrouve également la distinction instrumentale (Rabardel, 1995) entre les fonctions constituantes d'un système technique et ses modes opératoires appartenant aux pratiques d'enseignement (cf. Tableau 3).

	Système technique : application tangible sur table interactive, fonctions constituantes	**Pratiques enseignantes** : scénarios pédagogiques, modes opératoires prévus
Intégration des résultats de la conception dans l'activité des utilisateurs, sans considérer leurs apports	(A) Adaptation du système technique aux pratiques et aux besoins des enseignants	(B) Adaptation des pratiques des enseignants aux contraintes du système technique
Innovation par rapport à l'existant sans considérer l'adaptation aux besoins des utilisateurs	(C) Innovation technique par rapport au potentiel des tables interactives	(D) Innovation dans les pratiques des enseignants par rapport à leur activité actuelle

Tableau 3. Synthèse des effets attendus des hypothèses

Notons que dans une activité de conception d'un système technique plus classique, c.-à-d. sans technologie émergente, importance moindre pourrait être accordée au processus (C). Celui-ci est en effet fortement lié aux caractéristiques innovantes d'une technologie mobilisée en conception.

Par ailleurs, les formes d'apprentissage en conception participative (Béguin, 2003 ; Ehn, 1998) ont été associées à certains de ces processus. En conception de TICE impliquant des enseignants, ces apprentissages apparaissent essentiels en raison des besoins actuels en termes de formation des enseignants au numérique. Les apprentissages peuvent alors porter à la fois sur la technologie, ici des tables interactives, et leur rôle dans la médiatisation des activités

d'enseignement et d'apprentissage (Koehler & al., 2007). D'un point de vue épistémique, l'étude des apprentissages réalisés par les concepteurs tout au long d'un projet présente un intérêt potentiel pour les approches en ergonomie. Elle permettrait en effet de mettre en avant les facteurs sous-jacents à ces apprentissages afin d'instruire les approches en ergonomie de conception (Burkhardt, 2010)

Ces considérations à la fois productives (les méthodes) et constructives (les apprentissages) sur les activités de conception nous amènent à formuler les questions de recherche suivantes au regard des thématiques de ce travail de thèse :

- En quoi les solutions de conception rendent-elles compte de processus d'intégration d'une TICE dans des pratiques d'enseignement, d'adaptation des pratiques aux caractéristiques des tables interactives et d'innovation dans ces pratiques et par rapport au potentiel technologique ?
- Dans quelle mesure les méthodes utilisées en conception favorisent-elles ces processus ?
- En quoi permettent-elles d'engager des apprentissages chez les enseignants concepteurs ?
- En quoi ces apprentissages influent-ils sur les processus d'intégration et d'innovation ?

En s'intéressant à ces questions, **cette recherche vise à instruire les activités de conception de TICE par l'étude des caractéristiques méthodologiques favorisant le développement d'une activité future par l'articulation entre des processus d'intégration, d'innovation et d'apprentissage en conception.**

4 Stratégie de recherche

Afin de répondre aux questions que nous avons formulées, les analyses porteront sur l'activité de conception mise en œuvre dans le cadre du projet Tactileo. Celle-ci a en effet mobilisé les différentes méthodes dont nous cherchons à étudier les effets, sur un large empan temporel.

Dans un premier temps, nous montrerons dans quelle mesure les résultats de la conception résultent de processus d'intégration/innovation. Pour cela, les chapitres 5 et 6 portent sur la prospection des usages possibles des tables interactives en classes et sur l'analyse des besoins des enseignants. Les résultats, relatifs au cadrage du champ des possibles, permettront de

discuter du caractère innovant et intégré des solutions de conception dans le chapitre 7, et de discuter de la première question de recherche.

Le chapitre 8 porte sur les trois dernières questions de recherche en présentant une décomposition de l'activité de conception participative afin de mettre en lumière les principales caractéristiques méthodologiques de chacune d'elles. Il décrit ensuite les échanges entre concepteurs relatifs aux choix de conception concernant certaines composantes des solutions de conception. L'analyse de ces échanges vise à caractériser les justifications et les effets attendus des choix de conception afin d'identifier les processus d'innovation et d'intégration auxquels ils se réfèrent. Nous mobiliserons pour cela la notion d'hypothèses de conception décrite dans le chapitre 2. Celles-ci devraient ainsi nous permettra d'appréhender les dimensions constructive et productive de l'activité des concepteurs.

Troisième partie : Partie empirique

Chapitre 5 CADRAGE INITIAL DE LA SITUATION CIBLE DE LA CONCEPTION

Ce chapitre décrit les travaux exploratoires menés en amont de la conception à proprement parler. Ces travaux ont permis d'amorcer le processus de conception effective en tenant compte du contexte du projet Tactileo, de type *Technology-push*, et du caractère émergent des interfaces tangibles sur table interactive.

La première partie présente une étude prospective sur les usages potentiels des tables interactives en classes. Celle-ci a permis d'orienter le choix de la situation cible pour la conception vers l'enseignement des sciences physiques et de la chimie.

La deuxième partie porte sur l'analyse de la tâche des enseignants en physique-chimie et rend compte des résultats d'études exploratoires sur la forte variabilité dans les activités d'enseignement de cette discipline.

Les résultats de ce chapitre ont permis de restreindre le champ des possibles et de choisir les activités d'enseignement et d'apprentissage de l'optique en 4^{e} comme situations à transformer, par le biais d'une démarche de conception participative.

1 Anticipation des usages potentiels des tables interactives pour l'enseignement

Dans le cadre du projet Tactileo, un objectif pragmatique du travail de thèse était de participer à la conception d'une application tangible sur table interactive pour la formation en milieu scolaire. Initialement, la discipline et le niveau d'étude cible étaient peu spécifiés, seule la technologie l'était. Le contexte général de la démarche de conception était alors plus proche du cadre de l'ergonomie prospective (p. ex. Brangier & Robert, 2014) que de ceux proposés en ergonomie de conception (p. ex. Falzon, 2005).

Dans cette étape préliminaire, une enquête en ligne par questionnaire a été réalisée afin d'identifier des situations d'enseignement et d'apprentissage pour lesquelles les tables

interactives auraient potentiellement pu présenter un intérêt. Un atelier de créativité a ensuite été mis en place afin de faire émerger des idées d'usages dans ces situations (Knibbe, Mégard, Lémonie & Falzon. 2015).

1.1 Étude préliminaire sur les disciplines pouvant bénéficier des tables interactives

L'enseignement dans le primaire (écoles) et le secondaire (collèges et lycées) renvoie à une grande diversité de disciplines, qui induisent différentes techniques d'enseignement et différents contenus à enseigner. Une enquête en ligne a été menée auprès d'enseignants afin de recueillir des informations générales sur leurs méthodes d'enseignement actuelles, avec ou sans technologie, et pour recueillir des propositions d'usages des tables interactives afin de restreindre le champ d'applications possibles. Cette partie décrit les principales idées d'usage qui ont émergé et les disciplines auxquels elles pourraient se rattacher. Seuls les résultats pertinents pour cet objectif sont présentés.

1.1.1 Méthode

39 participants ont été recrutés dans les réseaux professionnels et personnels des auteurs. En raison de la diffusion volontairement large et aléatoire du questionnaire, la répartition des enseignants selon les disciplines ou les niveaux d'enseignement possibles est peu équilibrée. Ils se répartissaient comme suit : dans le primaire, 9 instituteurs (multidisciplinaires) et dans le secondaire (collège et lycée) : 10 enseignants en sciences de la vie et de la Terre, 6 enseignants d'éducation physique et sportive, 5 enseignants de physique-chimie, 4 enseignants de mathématiques, 2 enseignants d'histoire-géographie, 2 enseignants en anglais et un enseignant de sciences sociales.

Le questionnaire débutait par une présentation du projet Tactileo, des technologies (tables interactives, interfaces tangibles et tablettes tactiles). Les fonctions et les interactions possibles étaient illustrées par des photos et des exemples d'applications tangibles générales. Parmi les items proposés dans l'enquête, nous nous intéressons en particulier à un item intitulé : « Décrivez un exemple concret d'amélioration possible de votre enseignement avec des tables interactives ». Cette formulation avait pour but d'amener les participants à décrire une application ou un usage potentiel de la technologie à partir de leur activité actuelle.

1.1.2 Principaux résultats

Sur les 39 enseignants qui ont répondu au questionnaire général, 16 ont proposé des usages des tables interactives dans leur classe. 23 d'entre eux n'ont pas répondu à l'item ou ont expliqué qu'ils ne voyaient pas d'usage concret de la technologie dans le cadre de leur enseignement.

Près de la moitié des participants enseignaient des disciplines scientifiques (mathématique, physique-chimie ou SVT). Par conséquent, 7 propositions d'usages sur les 16 recueillies au total y faisaient référence (p. ex. *manipuler une représentation en trois dimensions d'une molécule ; réaliser une expérience avec des objets tangibles ; comparer différentes mesures d'un phénomène naturel*). En outre, deux propositions renvoyaient à *l'étude d'une carte* en géographie ou en course d'orientation. Enfin, 7 propositions n'étaient pas liées à une discipline spécifique, par exemple : *utiliser la table interactive pour recueillir les productions d'élèves et les synthétiser, mettre en place des activités collaboratives, faire travailler les élèves sur un serious game sous la forme d'un jeu de plateau.*

Cette étude préliminaire avait pour but d'orienter la démarche de conception vers certaines disciplines à investiguer davantage. D'après les résultats, les disciplines scientifiques semblaient présenter un intérêt fort et ont été choisies pour l'étape suivante.

1.2 Prospection sur des usages potentiels dans les disciplines scientifiques

L'enquête en ligne a révélé une grande diversité de techniques d'enseignement utilisées dans les disciplines scientifiques : différentes tâches sont proposées aux élèves avec des travaux en groupes ou individuels, sur tables ou avec du matériel expérimental, de la simulation informatique, des analyses documentaires, etc. Une séance de *brainwritting* a été mise en place afin de recueillir des idées d'usages potentiels en lien avec ces différentes tâches.

1.2.1 Méthode

Dix enseignants ont participé à l'atelier de créativité : 4 instituteurs qui abordent les sciences à l'école ; 6 enseignants du secondaire, 3 en SVT et 3 en physique-chimie. La table interactive et les objets tangibles étaient d'abord présentés puis les participants ont interagi librement à l'aide d'un démonstrateur (cf. Figure 11). Ce démonstrateur a été développé sur une table interactive *Samsung SUR40* et quelques objets tangibles ont été conçus par les expérimentateurs. Il proposait une application qui permettait de faire apparaître et manipuler

différents médias (images et vidéo) par l'intermédiaire d'objets tangibles. Ces derniers servaient notamment à modifier le volume d'une vidéo, zoomer sur une image ou sauvegarder l'emplacement d'objets tangibles sur la table interactive. L'objectif de cette initiation avec le démonstrateur était de montrer des interactions tangibles basiques pour que les participants se familiarisent avec la technologie.



Figure 11. Démonstrateur tangible sur table interactive utilisé par les participants de l'atelier créatif

Après cette phase introductive (25 minutes), les participants étaient invités à imaginer d'usages possibles avec des tables interactives en classe et à les écrire sur des Post-It (15 minutes). Il était précisé qu'ils devaient respecter les règles générales définies par Osborn (1953) pour la génération d'idées : *ne pas critiquer les idées des autres, favoriser la quantité d'idées plutôt que la qualité, ne pas se censurer et encourager la combinaison et la construction à partir des idées des autres*. Chaque participant décrivait brièvement ses propositions (35 minutes). Enfin, par groupe de 3 ou 4, il leur était demandé de détailler une proposition de leur choix parmi celles qui avaient été émises afin de les étoffer (30 minutes). Une restitution collective était faite à la fin (15 minutes).

Aux idées d'usage recueillies dans cette séance de brainstorming ont été ajoutées les propositions qui avaient émergé dans les questionnaires. L'ensemble des propositions a été

analysé afin de faire ressortir des usages généraux des tables interactives potentiellement intéressants pour les disciplines scientifiques.

1.2.2 Résultats

La séance de *brainwritting* a permis de recueillir 53 propositions d'usages, auxquelles ont été ajoutées certaines des 14 des 16 propositions issues de l'enquête en ligne. Les deux propositions écartées ne renvoyaient pas à des disciplines scientifiques.

Les propositions ont été regroupées selon trois grands thèmes :

- la simulation d'un phénomène ou de concepts scientifiques ;
- la mise en place d'activités collaboratives pour les élèves ;
- l'étude de, ou l'interaction avec, différents objets virtuels sur l'écran de la table interactive (p. ex. des images, des vidéos, du texte).

Ces thèmes ne sont pas exclusifs en cela que 8 propositions faisaient référence à deux d'entre eux ou plus. Par exemple, une idée d'usage développée dans la deuxième partie de l'atelier de créativité a porté sur *la simulation collaborative du système digestif en utilisant des outils tangibles*, renvoyant ainsi à la fois à la simulation et au travail collaboratif. De plus, pour chaque grand thème, nous avons relevé les caractéristiques techniques et interactives des tables interactives qui étaient les plus souvent mobilisées.

Sur les 67 propositions d'usages, 25 faisaient référence à la simulation de phénomènes réels (p. ex. implantation d'un bâtiment tangible dans une ville virtuelle ou simulation de l'effet d'une lentille tangible sur un rayon lumineux virtuel), de concepts abstraits (manipulation d'objets géométriques tangibles pour étudier les intersections avec un plan ou étude de la modélisation d'un phénomène physique), de sujets complexes (étude du corps humain ou d'un volcan), de phénomènes dont l'échelle présente habituellement des limites (étude des planètes du système solaire ou manipulation de molécules virtuelles). Sur les 25 propositions de ce type, 18 impliquaient des objets tangibles.

17 propositions concernaient l'utilisation de la table interactive comme support pour des tâches collaboratives (p. ex. élaboration collective d'un diagramme ou réalisation d'une tâche dans laquelle chaque élève aurait un rôle spécifique). 9 idées d'usages étaient assimilées à des *serious game* sous la forme de jeu de plateau ou de jeu de cartes tangibles. Ce thème n'a pas fait référence à une caractéristique de la technologie en particulier.

12 propositions ont fait référence à des tâches de manipulation d'objets virtuels affichés sur l'écran de la table interactive dans différents cas : la manipulation et la synthèse d'un grand nombre de documents (pour la réalisation d'un poster, pour préparer une présentation ou pour analyser des données recueillies sur le terrain en SVT), la manipulation de documents de différentes natures (vidéo, image, texte) ou d'images de grandes tailles (étude d'une carte interactive en géologie). 7 des 12 propositions ont mentionné la taille de l'écran d'une table interactive comme étant une caractéristique importante pour ce type d'usage.

1.3 Discussion

Au premier abord, les principaux usages ayant émergé (simulation, collaboration et visualisation) sont cohérents avec la littérature et les usages généraux existants des tables interactives (Benko & al. 2009 ; Price & al., 2009). De plus, ces résultats mettent en avant deux caractéristiques potentiellement innovantes des tables interactives (les interactions tangibles et la taille de l'écran d'une table interactive) qui les démarquent de la plupart des autres TICE existantes.

Les usages proposés par les enseignants renvoient à des ressources potentielles pour l'enseignant grâce à la technologie avec deux intérêts principaux. D'une part, elle permettrait de dépasser leurs limites actuelles. Par exemple, l'étude de phénomènes physiques réels fait partie du contenu des enseignements actuels, cependant, d'après les enseignants, les élèves éprouvent parfois des difficultés pour comprendre les modèles scientifiques sous-jacents. La simulation tangible pourrait alors faciliter leur compréhension en les illustrant et en faisant le lien entre une expérience réelle et le modèle physique correspondant. D'autre part, elle serait source de diversification pour l'enseignant, par exemple pour mettre en place des tâches collaboratives ou utiliser des *serious game*s de façon innovante, originale et propre à ce type de technologie.

1.4 Intérêt des usages anticipés pour la conception

La plupart des disciplines enseignées de l'école au lycée pouvaient bénéficier, a priori, de technologies telles que les tables interactives et les objets tangibles pour réaliser des tâches collaboratives ou de visualisation avec les élèves. En revanche, la simulation de phénomènes réels renvoie davantage aux disciplines scientifiques. Les résultats suggèrent d'ailleurs que les objets tangibles seraient particulièrement intéressants pour ce type d'usage. Dans la mesure où nous étions libres de choisir une discipline en particulier pour la conception, notre choix s'est

alors orienté vers la physique-chimie de collège. L'idée initiale était de concevoir un dispositif de simulation tangible ou d'expérimentation augmentée utilisable également au lycée.

Ainsi, à ce stade de la conception, l'intérêt principal du cadrage du champ des possibles par rapport aux tables interactives et à ses usages a été de faciliter l'identification de disciplines cibles pour le reste de la conception. L'innovation technique et dans les pratiques d'enseignement était alors prioritaire sur l'intégration concrète des tables interactives dans l'enseignement et l'apprentissage de ces disciplines.

2 Analyse de la tâche d'enseignants de physique-chimie

Une fois que le champ des situations cibles de la conception a été restreint à la physique-chimie au collège, l'étape suivante a consisté à analyser la tâche actuelle des enseignants dans ces situations, sans tables interactives, en tant que situations de référence. Pour cela, une analyse documentaire

2.1 Contenu des programmes scolaires

Les *Programmes des enseignements de mathématiques, de physique-chimie, de sciences de la vie et de la Terre, de technologie pour les classes de sixième, de cinquième, de quatrième et de troisième du collège* (Bulletin officiel spécial n° 6 du 28 août 2008) sont définis par le Ministère de l'Éducation Nationale. Ils représentent la principale prescription dans l'activité d'un enseignant de collège en mathématiques, physique-chimie, sciences de la vie et de la Terre ou technologie.

2.2 Un tronc commun aux disciplines scientifiques et technologiques

Dans la première partie des programmes : les mathématiques, la physique-chimie, les sciences de la vie et de la Terre et la technologie font l'objet d'une présentation commune. Cela correspond à une volonté de cohérence dans le système éducatif entre ces disciplines concernant la culture scientifique et technologique et le socle commun de connaissances et de compétences à acquérir au collège.

Une partie de ce tronc commun insiste sur l'importance de privilégier une *démarche d'investigation* dans les disciplines scientifiques et la technologie. Ce type de démarche vise à amener les élèves à se questionner sur le *monde réel* en favorisant autant que possible l'observation, l'expérimentation ou l'action directe par ces derniers. Le canevas d'une démarche d'investigation, décomposé en sept *moments* essentiels, est proposé pour guider les enseignants :

- le choix d'une situation-problème ;
- l'appropriation du problème par les élèves ;
- la formulation de conjectures, d'hypothèses explicatives, de protocoles possibles ;
- l'investigation ou la résolution du problème conduite par les élèves ;
- l'échange argumenté autour des propositions élaborées et autour des résultats obtenus ;
- l'acquisition et la structuration des connaissances (p. ex. nouveaux éléments de savoir ou confrontation avec le savoir établi) ;
- la mobilisation des connaissances (réinvestissement dans de nouveaux problèmes, automatisation de certaines procédures, évaluation des connaissances et des compétences méthodologiques).

Cette démarche d'investigation ne représente pas une suite d'étapes à suivre à la lettre à chaque séance. De plus, pour chaque *moment*, des exemples de techniques d'enseignement et des tâches d'apprentissage sont proposés aux enseignants. Ils doivent alors adapter la démarche d'investigation en choisissant et en articulant ces techniques en fonction par exemple du contenu à enseigner, des ressources dont il dispose ou de son expérience.

2.3 L'enseignement de la physique-chimie au collège

La seconde partie du programme décrit plus spécifiquement les *connaissances* et les *capacités* que doivent acquérir les élèves en physique-chimie. Elles correspondent à des objectifs didactiques pour les enseignants et sont réparties par classe, de la 5^{e} à la 3^{e}, et par thèmes. Chacun d'eux est découpé en sous-thèmes, avec des *connaissances* et des *capacités* précises.

Outre les objectifs didactiques liés aux connaissances et aux capacités que doivent acquérir les élèves, le programme décrit, d'un point de vue méthodologique, des attentes en termes de travail des élèves et d'évaluation de leurs apprentissages. Il insiste par exemple sur :

- l'articulation du travail des élèves autour d'*activités* qui doivent cibler clairement les connaissances et les capacités mises en œuvre ;
- l'utilisation de supports thématiques variés, empruntés notamment à la vie courante et à l'actualité ;
- le travail personnel des élèves en dehors de la classe pour compléter les *activités* conduites en classe (p. ex. résolution d'exercices d'entraînement, travaux écrits consécutifs à des recherches personnelles, analyse/établissement de protocoles expérimentaux) ;

Ces éléments méthodologiques doivent être articulés avec la démarche d'investigation présentée précédemment. Afin d'éviter toutes ambiguïtés, nous appellerons « TP-cours » les « *activités* » susnommées.

2.4 Variabilité des situations d'enseignement et d'apprentissage en physique

Cette synthèse montre que les programmes scolaires prescrivent assez précisément les contenus à transmettre aux élèves en termes de savoirs et de savoir-faire. En revanche, les moyens pour y parvenir sont relativement larges. Des techniques d'enseignement ou des tâches d'apprentissage sont proposées, mais il appartient à l'enseignant de les sélectionner lorsqu'il élabore son enseignement. De plus, il existe a priori une multitude de facteurs qui peuvent influencer ces choix : par exemple des facteurs matériels, temporels ou organisationnels, l'expérience de l'enseignant, ses préférences personnelles ou encore les caractéristiques des élèves.

Par conséquent, il était raisonnable de s'attendre à une grande variabilité dans les pratiques d'enseignement et, a fortiori, d'apprentissage. Une étude exploratoire (décrite en Annexe 1) menée auprès d'enseignants de physique-chimie a mis en avant cette variabilité dans les contenus enseignés, les techniques d'enseignement, les tâches d'apprentissage et les conditions matérielles et spatiales. En considérant ce caractère complexe des situations d'enseignement-apprentissage ainsi que le caractère émergent des tables interactives, il a été décidé de solliciter un échantillon d'enseignants pionniers. Ces derniers devaient participer à la conception et mettre en œuvre les solutions produites dans leurs classes. Ce choix méthodologique visait à considérer un nombre réduit de situation de référence dans lesquelles ces solutions seraient déployées afin de favoriser leur intégration.

3 Précision de la situation cible de la conception

Ce chapitre a permis de rendre compte des travaux menés en amont de la conception en elle-même. Il a été nécessaire de restreindre le champ des situations possible, initialement peu spécifié, pour le projet de conception. L'analyse prospective des attentes d'enseignants par rapport aux tables interactives et aux interactions tangibles a permis anticiper des usages présentant un intérêt pédagogique et didactique. En cela, les disciplines scientifiques se sont révélées prometteuses, en particulier pour les attentes prospectives en lien avec la simulation de phénomènes scientifiques avec des objets tangibles. Cependant, l'enseignement dans ces disciplines renvoyait à des situations très diversifiées, surtout concernant les pratiques d'enseignement des contenus didactiques prescrits. Par conséquent, il a été décidé de mettre en place une démarche de conception participative avec quelques enseignants, en tant qu'utilisateurs pionniers de l'application tangible à concevoir.

L'Institut Français de l'Éducation (IFE), partenaire du projet Tactileo, a été consulté afin de nous aider à identifier des enseignants qui pourraient participer à la démarche de conception. L'IFÉ mène des travaux de recherche en sciences de l'éducation et en didactique dans différentes disciplines en relation étroite avec des enseignants et des établissements scolaires. Nous avons été mis en relation avec un de leurs groupes de travail (GT) constitué d'une chercheuse en didactique de la physique et de deux enseignants de physique-chimie. Ces derniers représentaient des « enseignants ressource » en raison de leur participation à la conception de ressources pédagogiques[2] pour l'enseignement de la physique, en particulier les scénarios pédagogiques destinés aux enseignants. Les ressources conçues sont ensuite mises à disposition des enseignants et accessibles en ligne.

Suite aux échanges avec le groupe de travail de L'IFÉ, les situations d'enseignement et d'apprentissage de l'optique en 4^{e} ont été choisies comme situations cibles du projet de conception. Les membres du groupe de travail de L'IFÉ étant intéressés par la conception d'une application tangible sur ce thème, ils ont accepté de participer à l'ensemble du processus de conception. Le chapitre suivant décrit leurs besoins.

[2] http://pegase.ens-lyon.fr

Chapitre 6 ANALYSE DES BESOINS AVEC LE MODELE DES TPACK

Ce chapitre présente les résultats de l'analyse des besoins par rapport à la situation retenue pour le processus de conception d'une application tangible sur table interactive. Nous avons vu dans le chapitre 3 l'importance de cette analyse dans une activité de conception (p. ex. Anastassova, 2006 ; Couix, 2012 ; Loup-Escande, 2010).

À titre de rappel, en reprenant la définition de Couix (2012), les besoins sont relatifs aux caractéristiques organisationnelles, techniques ou physiques de l'activité des futurs utilisateurs, à ses éléments structurants et aux caractéristiques physiques et cognitives des futurs utilisateurs.

Ce chapitre porte sur l'analyse des besoins des membres du GT de L'IFÉ lors d'entretiens réalisés au début d'une démarche de conception participative. Nous montrerons que les besoins explicités font partie des connaissances des participants.

Une analyse des échanges relatifs aux besoins des participants a pour cela été réalisée à l'aide du modèle des TPACK (Koelher & Mishra, 2005) afin de caractériser ces besoins de façon détaillée.

Ainsi, les résultats devaient à la fois alimenter l'activité de conception (visée pragmatique) lorsqu'ils seraient réinjectés en conception afin de cadrer le champ des possibles dans l'élaboration d'un compromis entre intégration et innovation et dans les apprentissages en conception (cf. chapitre 8). De plus, ils devaient constituer une base pour l'analyse de leurs effets sur cette élaboration afin de répondre à nos questions de recherche (visée épistémique).

1 Le prescrit des programmes scolaires

Les principaux thèmes abordés en optique en 4e, d'après les programmes scolaires, sont intitulés (i) *les lumières colorées et la couleur des objets*, (ii) *lentilles, foyers et images* et (iii) *la vitesse de la lumière*. La démarche de conception a porté sur la plus grande partie du premier des trois thèmes : les lumières colorées et la couleur des objets. Les objectifs en termes de « *connaissances* et de *capacités »* (selon la terminologie employée dans les programmes disciplinaires officiels) à acquérir par les élèves d'après le programme de physique-chimie sont présentés dans le Tableau 4. Extrait du programme scolaire relatif à la partie sur l'optique considérée pour la conception

(*Programmes des enseignements de mathématiques, de physique-chimie, de sciences de la vie et de la Terre, de technologie pour les classes de sixième, de cinquième, de quatrième et de troisième du collège.* Bulletin officiel spécial n° 6 du 28 août 2008). Les connaissances portent principalement sur des principes physiques liés aux lumières colorées et à la couleur des objets ; les capacités renvoient à la conception et au suivi d'un protocole expérimental.

Connaissances	**Capacités**
La lumière blanche est composée de lumières colorées	Suivre un protocole pour obtenir un spectre continu par décomposition de la lumière blanche en utilisant un prisme ou un réseau
Éclairé en lumière blanche, un filtre permet d'obtenir une lumière colorée par absorption d'une partie du spectre visible	Extraire des informations d'un fait observé
Des lumières de couleurs bleue, rouge et verte permettent de reconstituer des lumières colorées et la lumière blanche par synthèse additive	Suivre un protocole Faire des essais avec différents filtres pour obtenir des lumières colorées par superposition de lumières colorées
La couleur perçue lorsqu'on observe un objet dépend de l'objet lui-même et de la lumière qui l'éclaire	Faire des essais pour montrer qualitativement le phénomène Présenter à l'écrit ou à l'oral une observation
En absorbant la lumière, la matière reçoit de l'énergie. Elle s'échauffe et transfère une partie de l'énergie reçue à l'extérieur sous forme de chaleur	Extraire d'un document (papier ou numérique) les informations relatives aux transferts énergétiques.

Tableau 4. Extrait du programme scolaire relatif à la partie sur l'optique considérée pour la conception

Le programme indique également que les enseignements s'appuient sur les notions acquises en 5e concernant notamment le trajet rectiligne et le sens de propagation de la lumière d'après le modèle du rayon lumineux en optique géométrique.

Ces éléments succincts de prescription servent habituellement de base aux enseignants pour construire une séquence d'enseignement (Bécu-Robinault, 2007). Afin de faciliter la compréhension de la suite de ce document, l'annexe 2 résume les principes sous-jacents aux phénomènes d'optiques étudiés en 4e.

2 Étude d'une situation de référence d'enseignement en physique

L'étude d'une situation de référence avait pour but d'accéder à l'activité réelle d'un enseignant concepteur au regard des prescriptions du programme scolaire afin de repérer notamment :

- le déroulement type d'un cours, les objectifs de l'enseignant ;
- les tâches proposées aux élèves par l'enseignant, en particulier les expériences ;
- les formes de représentations utilisées en classe, p. ex. schémas, modèles ou dessins ;
- les difficultés rencontrées d'après l'enseignant et ses besoins actuels.

Les données ont été recueillies principalement au cours de deux sessions d'entretiens collectifs, d'environ 2h, entre les ergonomes et des membres du GT de l'IFÉ : un enseignant de physique-chimie et une enseignante-chercheure en didactique. Globalement, les échanges avec celle-ci ont porté sur l'approche générale du GT, les objectifs didactiques qu'il s'est fixé et en quoi les scénarios pédagogiques existants sont censés y répondre. Les entretiens avec l'enseignant de physique-chimie ont davantage porté sur son activité en classe.

Des observations ouvertes ont par la suite été réalisées lors de trois séances de cours (1h20) de l'enseignant de physique-chimie afin de compléter les analyses. Ces séances portaient sur le début de la séquence d'optique (c.-à-d. les TP-cours n° 1 et n° 2 décrits ci-après).

La première partie des résultats présente une synthèse du déroulement des TP-cours avec des éléments clés concernant les objectifs, les difficultés ou le matériel utilisé. Elle vise

principalement à illustrer l'activité de l'enseignant en classe et à contextualiser les besoins analysés dans la seconde partie. Ces besoins y sont interprétés en termes de connaissances des participants d'après le modèle des TPACK (Koehler & Mishra, 2005). Ils s'appuient en effet selon nous sur leur expérience, en tant qu'enseignant ou chercheur, sur leur formation initiale et sur les programmes scolaires.

Les verbalisations ont été retranscrites et segmentées par paragraphe de sens (plusieurs tours de paroles entre différents acteurs autour d'une même thématique) afin d'extraire les échanges relatifs aux besoins. Ils ont ensuite été catégorisés d'après les définitions des différents types de connaissances du modèle des TPACK afin de les catégoriser avec la grille du tableau ci-dessous.

Intitulé	**Réf.**	**Définition**
Content Knowledge	CK	Connaissances liées au contenu disciplinaire à enseigner, c.-à-d. les concepts, les théories, les cadres explicatifs, etc.
Pedagogical Knowledge	PK	Connaissances générales sur les processus et les pratiques d'enseignement et d'apprentissage, la gestion de la classe, le développement et l'implémentation de leçons, l'évaluation des élèves, etc.
Technological Knowledge	TK	Connaissances sur les technologies habituelles (papier, crayon, tableau…) et les nouvelles technologies ainsi que les modalités qu'elles proposent pour représenter l'information
Pedagogical Content Knowledge	PCK	Connaissances sur les représentations et la formulation des concepts, sur ce qui rend une notion plus ou moins difficile à apprendre, sur les techniques d'enseignement les plus appropriées pour chacune, sur les connaissances antérieures des élèves et les conceptions préexistantes, etc.
Technological Content Knowledge	TCK	Connaissances sur les relations entre le contenu et la technologie, en quoi le contenu d'une discipline est transformé par l'utilisation d'une technologie, comment elle le contraint et les nouveaux types de représentations qu'elle propose ou la flexibilité pour passer de l'une à l'autre
Technological Pedagogical Knowledge	TPK	Connaissances sur les différents outils technologiques existants pour réaliser une tâche donnée et sur le type de stratégie pédagogique à employer pour profiter au mieux d'une technologie donnée
Technological, Pedagogical and Content Knowledge	TPACK	Connaissances sur les représentations et la formulation de concepts en utilisant la technologie, sur les techniques pédagogiques qui exploitent au mieux la technologie pour enseigner un contenu donné, sur ce qui rend un concept plus ou moins difficile à apprendre et comment la technologie peut aider et sur comment la technologie peut être utilisée pour construire sur les connaissances existantes des élèves et pour les développer ou les renforcer.

Tableau 5. Grille de codage des verbalisations relatives aux besoins des participants

3 Résultats

3.1 Résumé de la séquence d'enseignement de l'optique en 4è

La séquence sur l'optique en 4e est décomposée en 7 TP-cours, chacun d'eux étant structuré d'après la démarche d'investigation préconisée dans le programme de physique-chimie (voir chapitre 5). Le découpage de chaque TP-cours selon cette démarche articule des phases de travail individuel, en groupe et en classe entière pour les élèves. Lorsque cela s'y prête, l'approche didactique adoptée par les enseignants vise, à partir de situations courantes, à élaborer un modèle de compréhension physique avec les élèves pour leur permettre d'interpréter ensuite d'autres phénomènes réels. La démarche d'investigation est généralement mise en œuvre comme suit :

- Une situation courante liée au phénomène physique étudié dans le TP-cours est introduite par l'enseignant ;
- L'enseignant pose une question aux élèves en lien avec la situation introduite, à laquelle les élèves doivent répondre oralement en formulant une prévision ;
- Un protocole expérimental est construit par les élèves en binôme pour tenter de vérifier leur prévision ;
- Une fois le protocole vérifié par l'enseignant, les élèves réalisent l'expérience en groupe et notent leurs observations, tout en interagissant avec l'enseignant qui passe entre les groupes ;
- Les élèvent rédigent leur conclusion par rapport leur prévision initiale au regard de l'expérience ;
- L'enseignant crée un débat collectif en revenant sur l'expérience réalisée afin de construire une « réponse de la classe » avec les élèves ;
- L'enseignant présente un bilan de l'activité avec les concepts physiques, les définitions et les résultats clés que les élèves doivent noter ;
- Les élèves font une auto-évaluation sur leur apprentissage des savoirs et des savoir-faire vus pendant le cours.

La suite de cette partie résume les TP-cours concernés par la conception. Un exemple de scénario pédagogique complet est donné pour le TP-cours n° 4. Les autres sont présentés dans l'annexe 4.

Le TP-cours n ° 1 aborde le phénomène d'*irisation* sur un CD correspondant aux reflets « arc-en-ciel » observés sur sa surface lorsqu'il est éclairé en lumière blanche. Ce TP-cours vise à introduire la notion de décomposition de la lumière, qui consiste à séparer les lumières colorées présentes dans la lumière qui éclaire un objet. Il vise également à montrer que cette décomposition n'est pas visible directement, et qu'elle requiert un instrument pour l'observer.

Dans le TP-cours n° 2, intitulée « Le spectroscope », les élèves sont amenés à utiliser l'instrument éponyme pour observer le spectre de la lumière émise par le soleil ou un néon. Ce TP-cours permet notamment de définir cette notion de spectre lumineux composé, pour la lumière blanche, d'un dégradé continu de certaines couleurs (cf. Figure 12). Les manipulations expérimentales de ce TP-cours présentent des risques en raison du danger que représente l'observation directe du soleil. De plus, les observations individuelles au spectroscope rendent difficile la réflexion en groupe, car les élèves ne voient pas forcément la même chose, c.-à-d. les couleurs dans le spectre ou ses caractéristiques.



Figure 12. Le spectroscope utilisé par les élèves et le spectre de la lumière blanche affiché par l'enseignant

Le TP-cours n° 3 porte sur la couleur des objets et les lumières colorées et invite les élèves à réaliser des expériences avec des objets colorés et des filtres colorés. Le bilan de ce TP-cours propose une forme de modélisation des phénomènes physiques abordés concernant les lumières absorbées et transmises ou diffusées (cf. Figure 13). Elle s'appuie sur le modèle du rayon lumineux en optique géométrique vu en physique-chimie en 5e. Ce modèle s'appuie sur

les lois physiques concernant la propagation rectiligne de la lumière partant d'une source lumineuse. L'enseignement de ce modèle vise à faire acquérir ces lois aux élèves afin qu'ils puissent interpréter des phénomènes lumineux expérimentaux correctement d'un point de vue physique. Les participants constatent en effet que des élèves pensent que la lumière part de l'œil vers ce qu'ils observent, alors qu'en réalité c'est l'inverse. Le choix de cette représentation souligne l'importance, pour l'enseignant, de prendre en compte les connaissances antérieures des élèves. À cela s'ajoutent les conceptions existantes concernant les phénomènes physiques traités et les difficultés qu'elles induisent :

- l'absorption d'une partie de la lumière par un objet colorée est difficile à appréhender pour une partie des élèves, d'après les enseignants ;
- au niveau expérimental, les enseignants constatent des biais expérimentaux dus aux lumières parasites dans la classe qui peuvent induire chez les élèves des compréhensions erronées d'après leurs observations.

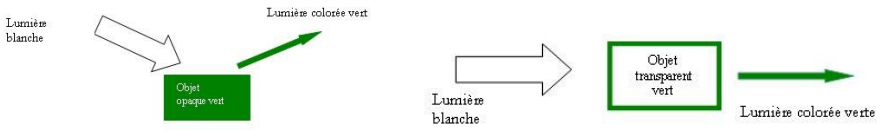


Figure 13. Modélisation des phénomènes optiques abordés dans le TP-cours 3 à recopier par les élèves

Le TP-cours n° 4 réinvestit les connaissances vues dans les TP-cours antérieurs afin d'aborder la couleur perçue des objets. Afin d'illustrer le déroulement du cours, voici le scénario pédagogique correspondant à ce TP-cours :

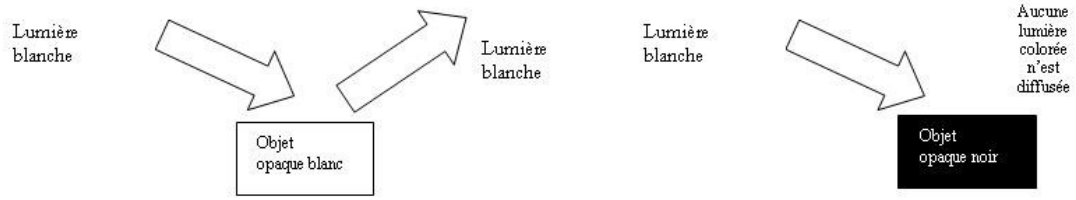
> **« TP-cours 4 : la magie des couleurs.**
> Philémon raconte à Cassiopée un tour de magie qu'il a vu au cirque : « Un magicien arrivait à changer la couleur des légumes : un poivron rouge est devenu vert ! » Ils voudraient bien comprendre ce tour de magie pour pouvoir le refaire et épater leurs amis. Pouvez-vous les aider ?
>
> 1. Prévision : À votre avis, comment le magicien a-t-il bien pu s'y prendre ?
> 2. Protocole : Avec le matériel à disposition, proposez des expériences.
> 3. Expériences : Réalisez vos expériences.
> 4. Observation : Notez vos observations.
> 5. Résultat : Votre hypothèse était-elle exacte. Si ce n'est pas le cas, reprendre à la question 1.
> 6. Conclusion :
>
> - De quoi dépend la couleur des objets ?
> - Représentez vos observations en utilisant une représentation identique à celle du bilan du TP-cours 3.
>
> Formulation collective : On pourra dire aux élèves, sans leur faire écrire, que l'on ne devrait pas dire qu'un objet est rouge (par exemple), mais dire qu'un objet apparaît rouge en lumière blanche ou en

lumière rouge ou toute autre lumière contenant de la lumière rouge…. On pourra montrer aux élèves la simulation avec Visiolab et la photo du poivron pour montrer qu'un objet coloré ne peut pas prendre n'importe quelle couleur.

Réponse de la classe : La couleur d'un objet dépend de la lumière qui l'éclaire.

Bilan n° 4 :

- La couleur perçue lorsqu'on observe un objet dépend de la couleur de l'objet et de la lumière qui l'éclaire. En physique, il n'est pas suffisant de dire qu'un objet est rouge : il faut également préciser les conditions d'éclairement.
- Le professeur éclaire à l'aide du rétroprojecteur des feuilles noires et blanches. Il fait discuter les élèves sur le schéma à représenter et sur le devenir de la lumière incidente sans y répondre en termes d'énergie (cela sera étudié lors du TP-cours suivant).
- Un objet noir absorbe toutes les lumières colorées, alors qu'un objet blanc n'en absorbe aucune.



Le TP-cours s'achève sur une auto-évaluation des élèves sur ce qu'ils estiment savoir faire ou non au terme du TP-cours concernant : formuler une révision, participer à la conception d'un protocole, mettre en œuvre un protocole, extraire des informations d'une expérience, valider ou invalider une prévision, formuler une conclusion.

La modélisation du phénomène physique étudié reprend les mêmes caractéristiques sémiotiques que dans le TP-cours n° 3 : représentation du rayon lumineux par une flèche et d'un objet opaque par un rectangle coloré. Cela renvoie à une volonté de cohérence, de la part des membres du groupe de travail à l'origine des scénarios pédagogiques, entre les TP-cours et en particulier dans les représentations proposées aux élèves. Les parties du bilan en rouge correspondent aux savoirs à acquérir dans ce TP-cours et doivent être notées par les élèves.

Le TP-cours n ° 5 aborde l'aspect énergétique de la lumière autour du fait que plus un objet est sombre, plus il absorbe la lumière du soleil, et plus il s'échauffe. L'énergie lumineuse est alors transformée en énergie thermique (cf. Figure 14).

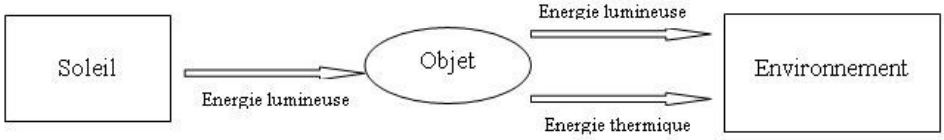


Figure 14. Modèle énergétique de la lumière présenté aux élèves à la fin du TP-cours 5

Le TP-cours n° 6 porte sur la synthèse additive et fait appel à la simulation informatique afin de tester différents cas de sources lumineuses colorées (cf. Figure 15). Ce TP-cours permet également de discuter avec les élèves des outils de simulation, définie dans le bilan comme « *une expérience que l'on reconstitue dans des conditions idéales en utilisant les règles de fonctionnement données par la physique* ». Parmi les difficultés rencontrées par les enseignants relativement à l'outil de simulation, la gestion du temps, la prise en main et l'aspect chronophage de la préparation du cours ont été mentionnés. De plus, le contenu de la simulation présentait des problèmes de cohérence avec les méthodes des enseignants. Par exemple, les tâches lumineuses rouge, verte et bleue sont directement superposées dès le lancement de la simulation. Or, pour l'enseignant, c'est un objectif à atteindre par les élèves, pour qu'ils comprennent que cette superposition donne de la lumière blanche. De plus, en termes de représentation, le fond noir sur lequel sont dirigés les projecteurs lumineux peut induire les élèves en erreur, car le noir est censé absorber toutes les lumières et ne rien renvoyer.

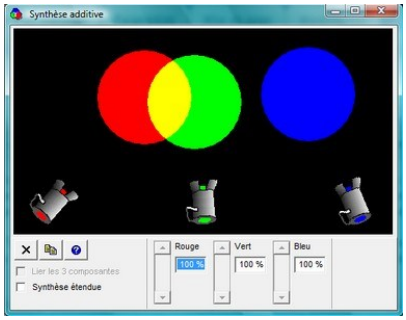


Figure 15. Exemple de logiciel de simulation pour aborder la synthèse additive des lumières colorées

Enfin, le TP-cours n° 7 propose une tâche documentaire sur la vision des couleurs par l'œil, le rôle des cônes et la transmission d'informations au cerveau. Les élèves doivent s'approprier un texte sur le fonctionnement de l'œil illustré par des schémas, puis répondre à des questions.

3.2 Besoins relevés et connaissances associées

Dans cette partie, les principaux besoins relevés chez l'enseignant de physique-chimie (ENS) et l'enseignante-chercheure en didactique (*DIDACT*) lors des entretiens collectifs avec les

ergonomes (*ERGO*) sont synthétisés. Des exemples de verbatim sont présentés afin d'illustrer et de justifier la catégorisation dans chaque type de connaissance du modèle des TPACK.

Les contenus à enseigner font partie des connaissances de type **CK** de l'enseignant et renvoient à ses objectifs. Ils sont prescrits par le programme scolaire, mais on remarque également l'existence de marges pour l'enseignant lorsqu'il ajoute ou reformule certains objectifs (Bécu-Robinault, 2007). C'est par exemple le cas du spectre lumineux : il n'est pas évoqué explicitement dans le programme de physique, mais il nécessaire selon l'enseignant pour enseigner la décomposition de la lumière. On retrouve également des objectifs qui découlent de ceux liés au programme scolaire dans les **PCK**, p. ex. celui de cohérence entre les TP-cours ou dans l'articulation des représentations proposées aux élèves. Il s'agit d'objectifs davantage opératoires qui combinent les contenus, ou leurs représentations, et les méthodes des enseignants.

> Exemple de l'utilisation des programmes scolaires pour concevoir les scénarios pédagogiques et des marges prises par l'enseignant
> [ENS 1] : **Les objectifs [des scénarios existants] sont ceux du programme officiel** […] à savoir que la lumière blanche est composée d'une multitude de lumières colorées, savoir comment décomposer la lumière, en utilisant donc un spectroscope. […] Pour arriver à cette connaissance, j'utilise une activité qui est l'utilisation d'un objet qui permet de décomposer la lumière blanche. **Cet objet, il est proposé dans le programme**, c'est un prisme ou un réseau, et pour nous c'est un spectroscope. Pour arriver au spectre donc il faut savoir ce qu'est un spectre, c'est un des objectifs du coup, même s'il est implicite dans les connaissances [des programmes]. La lumière blanche est composée d'une multitude de lumières colorées. Cette multitude, c'est le spectre. **Il n'est pas marqué en tant que connaissance à atteindre, mais pour moi il est implicite.**
>
> Exemple objectif d'articulation entre les représentations proposées aux élèves (entre activités expérimentales et activités de modélisation pour favoriser interprétation du réel par le modèle) et de cohérence entre les TP-cours
> [DIDACT] : En physique, **l'objectif c'est d'arriver à articuler le monde des modèles et des théories avec le monde des objets et des événements.** Sauf que quand on apprend, il y a un moment où les choses se mélangent et deviennent un peu incohérentes, puisqu'elles se mélangent. Mais c'est les élèves qui doivent faire ce mélange, ce n'est pas la situation qui doit le faire. C'est les élèves, pour apprendre, qui doivent mélanger les choses pour ensuite les différencier. […] Ce n'est pas parce qu'on le fait une fois, en fait on va le faire plein de fois, il y a plein de moments différents où **on va remobiliser les mêmes éléments de modèle avec des représentations qui sont semblables d'une situation à l'autre**.

Les pratiques pédagogiques concernant le découpage d'une séquence en plusieurs TP-cours ou le découpage de ces derniers en sous-tâches en lien avec les contenus physiques apparaissent dans les **PK** et **PCK** respectivement. Ces découpages correspondent à des formes invariantes de l'organisation de l'activité à considérer en conception, que ce soit pour les conserver en l'état ou pour les adapter. De plus, ces modes opératoires s'articulent également avec les marges dont l'enseignant dispose lorsque, par exemple, il choisit de faire travailler les élèves individuellement, en groupe ou en classe entière selon la sous-tâche (**PCK**).

Exemple du découpage en sous-tâches des TP-cours
[ENS 1] : Je pose une question en distribuant une activité avec **une situation « déclenchante », une situation d'entrée**, une petite histoire qui accroche, si possible, qui est faite pour ça, pour déclencher une interrogation, trouver un problème à résoudre. […]
ERGO : De là tu enchaînes sur la théorie ?
ENS : Non on fait l'activité, c'est-à-dire qu'ils donnent leur avis, **on fait une prévision et une hypothèse** et **il peut y avoir un protocole à donner ou à trouver**, selon les activités. Je peux parfois faire **l'expérience**, mais **la plupart du temps c'est quand même à eux de le faire** si les contraintes expérimentales s'y prêtent pas bah c'est moi qui fait l'expérience. […]
[…]
[ENS 2] : ils ont une phase, **une fois que l'observation** a été faite […] de **confrontation par rapport à l'hypothèse**, donc ils ont une étape où ils doivent vérifier « est-ce que je me suis trompé ? Est-ce que j'avais raison en formulant ma prévision ? », c'est individuel. Et [pour] **conclure**, on pose une question.

Exemple de différentes formes de mise au travail des élèves selon les sous-tâches
[ENS 1] : La prévision, je demande toujours à ce qu'elle soit dans un premier temps **individuelle**. S'ils ne trouvent pas, ils en discutent **par groupe de deux ou trois**. Le protocole j'essaye de le faire construire **ensemble**. L'expérience ils la font ensemble et la vérification ils la font de manière **individuelle**. Ils peuvent avoir des hypothèses différentes, mais le même protocole. La conclusion ils la font de manière **individuelle** aussi. […] Et après, une fois qu'on est sorti du « groupe élèves », on passe à la **formulation en classe.** […] Une fois qu'ils ont fini l'activité, il y a une **phase en classe entière** où on discute des différentes conclusions, par exemple je les fais répondre, interagir.

Les technologies, à savoir le matériel expérimental et informatique, participent à l'élaboration des objectifs de l'enseignant ou aux moyens qu'il se donne pour les atteindre. Par définition, les connaissances des enseignants sur l'articulation entre technologies et contenus physiques (**TCK**) portent principalement sur deux aspects : le fonctionnement ainsi que les limites et les apports du matériel expérimental ou informatique pour représenter ou observer un phénomène donné. Ces connaissances constituent à la fois des ressources et des contraintes pour la pratique de l'enseignant, au même titre que celles sur les modes de gestion du cours possibles en fonction du matériel disponible (**TPK**).

Exemple d'apport de la simulation physique pour représenter certains contenus à enseigner
[ENS 1] : Il y a **un bon avantage dans Visiolab,** c'est qu'on peut avoir aussi la couleur des objets qu'il propose d'éclairer avec des lumières différentes. Avec un drapeau par exemple, on peut l'éclairer avec les trois couleurs primaires et les trois couleurs secondaires. Du coup la fenêtre est séparée en deux avec chaque type de lumière.

Exemple d'impact du matériel informatique sur la gestion de la classe
[DIDACT] : Une séance dure 55 minutes et dans cet exemple, le **temps de manipulation sur ordinateur** était à peu près de 3 minutes. Après **il y a le temps où ils s'amusent avec l'ordinateur**… Mais le temps où ils font l'expérience, où ils prennent les informations qui leur servent, **ça prend vraiment très peu de temps**…

Dans les échanges relevés, l'articulation des objectifs de l'enseignant, relatifs aux **CK** et **PCK,** avec les contraintes et les ressources dont il dispose (**TPK** et **TCK**) a souvent fait référence à des connaissances de type **TPACK** qui ouvraient des pistes d'amélioration possible de leur activité. Le contexte du projet de conception a en effet orienté les échanges

sur les manipulations expérimentales et les usages du numérique actuels afin de relever des manques, des difficultés ou des obstacles actuels. Par conséquent, plusieurs éléments ont émergé, tels que le caractère inadapté de certains outils de simulation ou d'expérimentation actuels par rapport aux méthodes d'enseignement :

- la réponse à une tâche prévue est parfois donnée directement par la simulation en début de manipulation ;
- des formes de représentation sont incompatibles avec les modèles physiques proposés par l'enseignant ;
- des manipulations expérimentales individuelles qui ne favorisent pas les interactions souhaitées par l'enseignant entre et avec les élèves.

On peut identifier ici des difficultés actuelles portant par exemple sur le manque d'adéquation entre les outils de simulations actuels et les méthodes d'enseignement, la cohérence des formes de représentation de la physique ou le soutien à l'activité collaborative.

> Exemple d'usage actuel du matériel informatique pour pallier les difficultés de compréhensions induites par l'expérimentation réelle
> [ENS 1] : Disons qu'**on a énormément de lumières parasites**. On est dans une salle de TP, dans l'idéal on devrait être dans une salle purement noire. Et chaque binôme devrait travailler un par un pour ne pas être gêné par la lumière de ses voisins. Ça serait une séance idéale. C'est complètement infaisable.
>
> Exemple de limites rencontrées par les enseignants par rapport aux outils de simulation actuels
> [DIDACT] : [en parlant d'Opticos] **ce qui pose problème dans ce logiciel**, c'est que si on veut déplacer un rond (une tâche lumineuse), il faut qu'on clique dessus et non sur le [projecteur], donc déjà il y a quelque chose qui va pas. Ensuite, **il y a un problème, car** on peut sélectionner les quantités de vert, de rouge et de bleu alors qu'en réalité on ne le traite pas, car si on y touche, on est embêté. **L'autre problème** qu'on avait, c'est que par exemple dès qu'on ouvre le logiciel, la solution est donnée donc l'enseignant doit déplacer les ronds (tâches de lumières) au début du cours et c'est une catastrophe, il n'a pas le temps de faire ça. En plus comme on manipule les tâches colorées, ça ne fait que renforcer le fait que ce sont des tâches colorées et non des lumières colorées. Du coup on a une superposition de modèles additifs et soustractifs, du fait de l'écran noir sur lequel on dirige les projecteurs, et qui ne devrait pas être noir…

Du point de vue de l'activité d'apprentissage des élèves, les résultats montrent que les enseignants disposent de connaissances de type **PCK** sur :

- les connaissances antérieures des élèves, notamment sur ce qu'ils ont vu en 5^{e} en optique ;
- les difficultés généralement rencontrées : les conceptions existantes ou les limites en termes de compréhension des élèves, d'après l'enseignant.

Ces résultats renvoient en particulier au fait que « les enseignants expérimentés soient experts dans la démarche qui consiste à ajuster la difficulté d'un problème à la capacité présumée des élèves à la résoudre » (Pastré, Mayen & Vergnaud, 2006) :

> Exemple de difficulté de compréhension liée aux conceptions des élèves
> [DIDACT] : Alors des choses sur lesquelles on s'appuie, car il faut savoir qu'elles existent, c'est **les conceptions des élèves. Donc c'est toutes les connaissances avec lesquelles ils viennent et qui nous enquiquinent souvent** […]. Alors il y a plusieurs choses : déjà sur la nature de la lumière colorée : pour les élèves, la couleur c'est une propriété des objets, par exemple « la table EST blanche ». Du coup **c'est très compliqué pour eux si je projette quelque chose dessus, de pouvoir anticiper (de quelle couleur ils la verront),** parce que la table est blanche, et le bleu qu'on peut voir… Ça leur pose question. Un pull bleu, si on projette de la lumière verte dessus, ça va être difficile. Voilà, donc **les interprétations des élèves sont généralement basées sur des interprétations causales simples**, ils n'arrivent pas à combiner en fait deux éléments différents. La couleur, c'est une propriété qui est immuable, on ne peut pas la changer. Elle se « transporte » donc si j'ai un projecteur bleu, c'est la couleur bleue qui se « transporte » et qui « éventuellement » va se déposer sur mon pull vert. Et la lumière colorée elle est « foncée ». **C'est lié à la représentation « couleur matière »**, c'est vraiment cette couleur qui est dedans et qui est un peu foncée qui va permettre de colorer.

Les connaissances antérieures des élèves constituent des ressources pour l'enseignant sur lesquelles il s'appuie pour construire son enseignement. Leur prise en compte peut par exemple amener les enseignants à favoriser la confrontation des conceptions existantes (« couleur-matière ») avec les modèles physiques liés aux contenus disciplinaires à enseigner (« couleur-lumière »). Cela est également vrai pour les difficultés de compréhension des élèves lors des manipulations expérimentales (**TPACK**), p. ex. les biais expérimentaux dus aux lumières parasites ou les ordres multiples du spectre lumineux observé avec le spectroscope. Ces difficultés découlent notamment des possibilités et des limites offertes par le matériel expérimental en termes de représentations des phénomènes physiques (**TCK**).

> Exemple de limite rencontrée avec les représentations offertes par le matériel expérimental pour la compréhension des élèves
> [ENS 1] : […] **Avec le spectroscope on voit aussi plusieurs niveaux de spectre** : les spectres d'ordre 1 etc. Et le spectre, avant qu'on en parle, c'est tous [les ordres], avec le blanc au milieu, donc ça peut être des choses comme ça. […] **Quand je leur demande de représenter ce qu'ils voient**, **ils représentent un peu tout** : la ligne blanche, le spectre d'ordre 1 et 2…
>
> Exemple de difficulté lors des observations des élèves dues aux biais expérimentaux
> [DIDACT] : […] on a **du mal à avoir des filtres qui sont corrects** du coup quand on éclaire en lumière rouge…
> [ENS 1] : Ouais il y a aussi pas mal de lumière blanche qui passe…
> [DIDACT] : Ca **et puis aussi après dans les salles de classe, il y a toutes les autres lumières** donc ce qu'on voit en fait c'est l'arc-en-ciel.

4 Synthèse des résultats

Les résultats de cette étude d'une situation de référence donnent plusieurs éléments clés pour la conception concernant le déroulement des TP-cours, les contenus abordés, les expériences réalisées en classe, le travail des élèves, etc. Le tableau 6 présente un résumé des besoins relevés en lien avec les catégories du modèle des TPACK.

Ce lien entre besoins et connaissances est selon nous justifié par les similitudes des besoins que nous avons relevés avec les connaissances mobilisées lors de la préparation de leur cours dans la littérature (Bécu-Robinault, 2007) :

- les enseignants déclarent prendre en compte les impératifs du programme scolaire ;
- selon les enseignants, l'importance donnée à ces impératifs peut cependant varier ;
- la maîtrise des contraintes matérielles est importante, en particulier pour les expériences à réaliser en classe ;
- les connaissances antérieures des élèves et leur compréhension des notions abordées dans le cours sont prises en compte lors de la préparation du cours ;
- une planification souple du cours permet une meilleure adaptation aux élèves et au terrain.

TYPE	BESOINS
CK	Les contenus à enseigner sont prescrits par le programme scolaire, qui peut être complété par l'enseignant
PCK	Les TP-cours et les représentations proposées aux élèves doivent être cohérents entre eux
PK	Une séquence d'enseignement se découpe en TP-cours
PCK	Un TP-cours est découpé en sous-tâches articulées avec les contenus à enseigner
PCK	Les connaissances antérieures et les difficultés récurrentes des élèves doivent être prises en compte dans l'élaboration du cours
TCK	Le matériel expérimental et informatique présente à la fois des avantages et des inconvénients pour représenter un phénomène donné
TPK	Le matériel disponible influe sur les modalités de gestion du cours
TPACK	Les objectifs d'enseignement doivent être articulés avec les ressources et les contraintes du dispositif « classe »

Tableau 6. Synthèse des besoins généraux relevés dans l'analyse des besoins

Les besoins relevés présentent un intérêt pour cadrer l'activité de conception. D'une part, ils rendent compte à la fois de formes invariantes de l'activité à conserver pour favoriser l'intégration des tables interactives en classe, p. ex. le principe de découpage des TP-cours en sous-tâches ou les contenus disciplinaires à aborder. D'autre part, ils ouvrent des pistes

d'amélioration, en particulier par rapport aux difficultés actuellement rencontrées par les enseignants ou les élèves.

Outre les besoins relevés dans ce chapitre, les résultats ont également montré que dans le cadre de son activité, l'enseignant avait recours à des scénarios pédagogiques pour soutenir son activité à différents niveaux. Ils peuvent être vus comme des formes d'auto-prescription qui cristallisent certaines dimensions de sa pratique d'enseignement, telles que le déroulement du cours, les consignes, les objectifs ou les tâches proposées aux élèves. Ce constat confirme ce qui a été proposé dans les chapitres 3 et 4 concernant l'intérêt d'une démarche de conception visant la construction conjointe des fonctions constituantes du système technique et les modes opératoires des futurs utilisateurs, c.-à-d. les scénarios pédagogiques.

Chapitre 7 PRESENTATION DE LA DEMARCHE DE CONCEPTION PARTICIPATIVE

Ce chapitre a deux objectifs par rapport à notre problématique. D'une part il introduit les méthodes suivantes dont nous souhaitons étudier l'effet sur les résultats de la conception :

- la construction conjointe du système technique et des pratiques d'enseignement ;
- l'implication de futurs utilisateurs ;
- la confrontation de leurs hypothèses de conception.

D'autre part, à l'aide des résultats des deux chapitres précédents sur le cadrage du champ des possibles, il propose de caractériser les solutions de conception en termes de processus d'innovation et d'intégration :

- l'adaptation du système technique aux pratiques et aux besoins des enseignants ;
- l'adaptation des pratiques des enseignants aux contraintes du système technique ;
- l'innovation technique par rapport au potentiel des tables interactives ;
- les innovations dans les pratiques des enseignants par rapport à leur activité actuelle.

Cette étape de caractérisation vise à répondre à notre première question de recherche :

- En quoi les solutions de conception rendent-elles compte de processus d'intégration d'une TICE dans des pratiques d'enseignement, et inversement, et les processus d'innovation dans ces pratiques et par rapport au potentiel technologique ?

Cette caractérisation est également un prérequis nécessaire pour analyser dans le chapitre suivant ces processus par rapport aux méthodes que nous considérons.

Afin de remplir ces objectifs épistémiques, la démarche de conception mise en place et ses résultats sont présentés. Cette démarche avait deux objectifs principaux, relatifs à la construction conjointe du système technique et des pratiques d'enseignement :

- spécifier un artefact logiciel ;
- adapter des scénarios pédagogiques existants.

Le processus de conception participative s'est déroulé sur 27 mois avec 14 réunions de conception.

Deux phases d'expérimentations de 4 à 6 semaines ont aussi été menées dans les classes des deux enseignants de physique-chimie impliqués dans la conception. Elles avaient pour but de confronter les choix des concepteurs à la réalité et d'améliorer le produit global de la conception. En outre, différents objets intermédiaires ont été mobilisés au fil de la conception, notamment des versions fonctionnelles de l'application tangible en cours de développement. La figure suivante (Figure 16) décrit le déroulement temporel de l'activité de conception avec les réunions de conception participatives, les deux phases d'expérimentations en classe et les itérations du prototype.

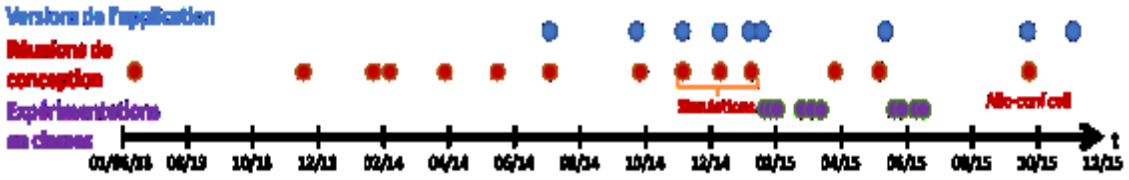


Figure 16. Synthèse du déroulement temporel de l'activité de conception

L'activité de conception a donné lieu à l'articulation de méthodes de conception issues des champs de l'ergonomie (conception participative et conception centrée utilisateur) et de la didactique (Design-Based Research). Cette articulation résulte de la participation des concepteurs (ergonomes, enseignants de physique-chimie et enseignante-chercheure en didactique) au projet Tactileo et de leurs expériences respectives en conception. Les tâches prévues et les points à aborder lors des réunions étaient généralement décidés conjointement entre les ergonomes et l'enseignante-chercheure en didactique. Les tâches productives étaient réparties selon les compétences de chacun entre les réunions, notamment pour la mise au propre des spécifications techniques (principalement les ergonomes) ou celle des scénarios pédagogiques (principalement les membres du GT de l'IFÉ).

La dernière partie de ce chapitre présente une synthèse des résultats de la conception concernant l'application tangible de simulation (cf. Figure 17) sur l'optique et les scénarios pédagogiques associés.



Figure 17. Exemple de simulation de la synthèse additive des lumières colorées dans le cas de sources de lumière bleue et rouge reflétées sur un objet blanc qui sert d'écran

1 La démarche de conception participative

1.1 Les réunions de conception participatives

1.1.1 Objectifs

1.1.1.1 Définition des spécifications de l'application tangible

Dans le cadre du projet Tactileo, un objectif des réunions de conception consistait à définir des spécifications en vue de réaliser un prototype fonctionnel et stabilisé. Pour cela les caractéristiques de l'application tangible de simulation ont dû être définies finement à plusieurs niveaux :

- les fonctions techniques (p. ex. les conditions d'affichage d'un élément de l'interface selon l'agencement spécifique de certains objets tangibles) ;
- les interactions tangibles et tactiles (p. ex. les manipulations des objets tangibles à prendre en compte ou les modalités tactiles de transition entre différents niveaux de représentation) ;
- les objets tangibles (formes et dimensions) et les images à afficher (type d'image, contenu et taille).

Ces éléments devaient permettre aux ergonomes de formuler des spécifications techniques dans un langage adapté au développeur informatique. En outre, ils étaient également repris par

les ergonomes pour produire des propositions d'objets tangibles et d'images mobilisées lors des interactions tangibles avec le simulateur.

1.1.1.2 Reformulation des scénarios pédagogiques existants

Le second objectif des réunions de conception était de reformuler les scénarios pédagogiques existants, rédigés en amont par le groupe de travail (GT) de l'Institut Français de l'Education (IFÉ) et mis en œuvre par les enseignants concepteurs dans leur activité d'enseignement.

En général, lorsqu'un enseignant prépare son cours, il définit ou adapte un scénario pédagogique pour guider son enseignement (p. ex. Durand, 1996). Il planifie son cours en construisant une « auto-prescription » (p. ex. Saujat, 2010) à partir des ressources dont il dispose (scénarios pédagogiques existants, manuels scolaires, expérience personnelle, formation, connaissances, etc.) et des contraintes auxquelles il est soumis (matériel disponible, nombre d'élèves dans les classes, durée du cours, caractéristiques personnelles, difficultés rencontrées par les élèves, etc.). Lors de sa mise en œuvre, le scénario pédagogique fait l'objet d'adaptations à chaud en fonction des aléas de l'activité en classe, qui constituent une forme de mise à l'épreuve de ces prescriptions.

Des scénarios pédagogiques existaient préalablement à la conception et ont servi de base pour l'élaboration de nouveaux scénarios intégrant l'application tangible de simulation. Les réunions de conception ont principalement consisté à reformuler et à enrichir ces scénarios pédagogiques existants. Ils étaient parfois modifiés directement, mais le plus souvent, des exigences sur leur contenu étaient formulées. Entre les réunions, les enseignants concepteurs et l'enseignante-chercheure en didactique actualisaient et mettaient en forme les nouvelles versions des scénarios pédagogiques.

1.1.2 Participants impliqués dans les réunions de conception

1.1.2.1 Le groupe de travail de l'Institut Français de l'Éducation

Le groupe de travail de l'Institut Français de l'Éducation qui a participé à la conception était constitué d'une enseignante-chercheure en didactique des sciences et de deux enseignants de collège en physique-chimie. Ils avaient travaillé ensemble à plusieurs occasions par le passé, dans le cadre d'activités de recherches sur la conception de ressources pédagogiques. À ces occasions, ils ont pu expliciter les contraintes, les normes et les caractéristiques de leurs pratiques enseignantes, et en débattre au regard de travaux de recherche sur le savoir et l'apprentissage des élèves (voir p. ex. Veillard, Tiberghien & Vince, 2011 pour des travaux

similaires). Par conséquent, l'enseignante-chercheure était familière de l'activité des deux enseignants de physique chimie. Elle avait pu réaliser des observations dans leurs classes et recueillir leurs retours d'expérience à plusieurs reprises. De plus, tous les trois étaient en accord sur l'approche didactique à adopter en conception de ressources pédagogiques.

L'enseignante-chercheure en didactique, si elle n'était pas une future utilisatrice du dispositif à concevoir, avait un rôle important dans la dynamique du groupe de travail existant. Des travaux montrent en effet que la présence d'experts sur les contenus disciplinaires à enseigner était recommandée en conception participative entre enseignants (p. ex. Handerzalts, 2009). Ces experts contribuent par exemple en apportant un point de vue éclairé sur l'acquisition par les élèves de concepts physiques difficiles et en orientant les échanges autour d'objectifs didactiques clairs.

De par l'expérience en conception des enseignants de physique-chimie impliqués, la question de leur représentativité des utilisateurs finaux se pose. En effet, les processus de conception participative donnent l'occasion aux participants d'expliciter leurs besoins, de faire preuve de réflexivité sur leur activité en vue de la transformer et d'envisager des pistes d'amélioration (p. ex. Tricot & Plegat-Soutjis, 2003).

Les enseignants que nous avons mobilisés étaient familiers de cet exercice. Selon les thèmes du programme, ils étaient par exemple conscients des difficultés qu'ils avaient rencontrées, des connaissances et des conceptions antérieures des élèves, des limites de certaines techniques d'enseignement ou des expériences pertinentes pour aborder une notion donnée du programme scolaire. Cela transparaît en particulier dans les résultats du chapitre précédent sur l'analyse des besoins qui a donné des résultats à ces différents niveaux.

Du point de vue de la conception de scénarios pédagogiques, ces différentes formes de connaissances ont donc pu impacter les caractéristiques des scénarios concernant par exemple : le discours de l'enseignant, le temps dévolu aux différentes sous-tâches, le choix des expériences à réaliser en classe avec les élèves ou encore les formes de représentations à proposer aux élèves. Le chapitre suivant illustre certains de ces points.

1.1.2.2 Prise en compte des processus d'apprentissage des élèves

Le chapitre 2 a abordé la nécessité de rassembler des participants qui soient représentatifs des utilisateurs finaux (Damodaran, 1996). Il semblerait donc logique, en conception de dispositifs à but éducatif, de prendre les élèves en compte. C'est par exemple le cas dans les

travaux en ergonomie orientée enfant (Décortis, 2015), qui repose sur l'analyse de l'activité des élèves.

Cependant, le statut des élèves peut révéler un obstacle de taille pour leur participation à l'ensemble du processus de conception. En effet, nous avons vu (p. ex. Couix, 2012) que les phases initiales de la conception correspondent à l'identification des besoins des futurs utilisateurs afin d'en déduire des exigences et des spécifications. Une spécificité de l'apprentissage, en milieu scolaire tout au moins, est que les apprenants n'ont pas toujours une vision globale des objectifs de l'enseignant (cf. la métaphore de l'acquisition de Sfard, 1998). Ce manque de recul rend difficile leur implication dans les premières phases de la conception, à la différence des enseignants qui sont plus souvent sollicités (p. ex. Cviko, McKenney & Voogt, 2013 ; Musial & al. 2011 ; Voogt & al., 2011). C'est pourquoi nous n'avons pas directement sollicité d'élèves dans les réunions de conception, mais plutôt lors de la mise en œuvre des produits de la conception en situation réelle.

De plus, une limite des approches focalisées exclusivement sur l'apprentissage peut être de laisser de côté l'activité des enseignants (Burkhardt, 2010), dirigée vers l'acquisition de connaissances par les élèves. Or cette activité doit être prise en considération dans le cadre de démarches de conception de TICE pour favoriser leur intégration dans le travail enseignant. Au final, les concepteurs doivent donc s'appuyer à la fois sur les activités d'enseignement et d'apprentissage.

Par ailleurs, afin de prendre en compte l'apprentissage sur l'ensemble de la conception, il a été montré que l'analyse d'une tâche-élève peut s'appuyer sur l'expertise d'un didacticien dans une discipline donnée afin d'identifier ce que l'élève peut faire pour la réaliser (Rogalski, 2008). Un didacticien peut en effet s'appuyer sur les différents types de processus d'apprentissage adaptés aux formes de connaissances des élèves (p. ex. Musial & al., 2011) afin de proposer des tâches d'apprentissages pertinentes dans le cadre de leur enseignement. C'était un des rôles de l'enseignante-chercheure en didactique qui a participé à l'ensemble de la conception.

1.1.2.3 Les ergonomes du CEA-LIST

Au moins un ergonome était présent à chaque réunion parmi les deux qui participaient au projet de conception (une ergonome experte en conception avec de nouvelles technologies et un doctorant en ergonomie).

Ils avaient plusieurs rôles lors des réunions de conception, dont celui de référent sur la technologie (tables interactives et interactions tangibles). Ce rôle se traduisait par la présentation des technologies, de leurs apports et limites potentiels, à la fois techniques et ergonomiques, notamment grâce aux résultats de l'analyse prospective (cf. chapitre 5) et à la littérature (cf. chapitre 3). De plus, ils rendaient compte de l'avancement de la réalisation de l'application tangible et des objets intermédiaires de conception.

En outre, les ergonomes étaient également co-concepteurs, critiques et forces de propositions d'après la littérature et les études menées sur le terrain. Ils assistaient la démarche globale en traçant la logique de conception concernant l'avancement des caractéristiques de l'artefact. Enfin, les ergonomes alimentaient, avec l'enseignant qui y avait participé, les restitutions post-expérimentales et émettaient des propositions d'amélioration en lien avec la technologie.

1.1.3 Matériel

Les réunions de conception avaient lieu dans les locaux de l'IFÉ, qui disposait d'une table interactive. Initialement, un démonstrateur avait été conçu en amont des réunions pour illustrer les principes de base des interactions tangibles. Il s'agissait du même que celui utilisé dans l'atelier créatif du chapitre 5. Dans un premier temps, des maquettes papier ont été utilisées. Par la suite, les concepteurs ont pu interagir avec différentes versions de l'artefact en cours d'élaboration, c.-à-d. les objets tangibles et le prototype de l'application logicielle.

Par ailleurs, les scénarios pédagogiques initiaux, ou en cours de reformulation, servaient également de support pour guider la conception.

1.1.4 Données recueillies

Des enregistrements audio de chaque réunion ont été réalisés et, pour certaines d'entre-elles, une caméra filmait les échanges entre concepteurs et leurs interactions avec la table interactive et les objets tangibles. Les différents supports mobilisés, ont également été collectés, p. ex. les croquis des concepteurs, les maquettes utilisées et les comptes-rendus des réunions.

1.2 Travail réalisé entre les réunions de conception

1.2.1 Tâches du GT de l'IFÉ

Entre les réunions de conception, les enseignants de physique chimie et l'enseignante-chercheure en didactique mettait en forme les décisions prises en réunion concernant les

scénarios pédagogiques. Ils poursuivaient également leur réflexion, entre eux à distance, pour aboutir à des versions stabilisées des scénarios d'une réunion à une autre.

1.2.2 Tâches des ergonomes et du développeur

Les ergonomes rédigeaient les spécifications des parties logicielles de l'application tangible à destination du développeur informatique après les réunions de conception. Afin de prendre en compte les spécificités des interactions tangibles, un paradigme de spécification dédié à ce type d'interface à servi de base : le *TUIML* (*Tangible User Interface Modeling Language*) de Shaer & Jacob (2009). Il vise à décrire l'intégralité d'une interface tangible à l'aide de trois types de diagrammes représentant la structure de l'interface et son comportement dynamique. Les auteurs avaient appliqué ce langage pour décrire des interfaces existantes et relativement simples. Dans notre cas, il a été partiellement utilisé pour initier la conception, mais jugé trop lourd pour être utilisé à chaque itération. Par la suite, les spécifications rédigées par les ergonomes étaient illustrées, priorisées et regroupées dans un tableau.

Les spécifications étaient discutées avec le développeur afin de les étoffer, de trouver des compromis et d'identifier les obstacles éventuels, liés au caractère émergent de la technologie. De plus, les ergonomes étaient responsables de la conception de la plupart des images affichées sur l'écran de la table interactive et de la fabrication des maquettes et des objets tangibles. Ils ont pour cela utilisé des logiciels de retouche photo (Paint.NET) et de Conception Assistée par Ordinateur (SolidWorks) pour réaliser des objets tangibles avec une imprimante 3D.

1.2.3 Données recueillies

La majorité des traces productives de travaux réalisés entre les réunions de conception étaient constituées des différentes versions des scénarios pédagogiques et des spécifications du prototype fonctionnel, des objets tangibles et des images à afficher. Elles ont été recueillies afin de guider les analyses du chapitre suivant sur la décomposition du processus de conception en phase.

1.3 Les phases expérimentales en classes avec les tables interactives

1.3.1 Objectifs

Les expérimentations du résultat de la conception en situation réelle d'enseignement constituent une pratique courante pour les membres du groupe de travail de l'IFE. Dans le

cadre du projet Tactileo, elles visaient à confronter les choix de conception au réel et à proposer des modifications des scénarios pédagogiques et du prototype.

1.3.2 Participants

1.3.2.1 Les enseignants

Les deux enseignants impliqués ont testé le dispositif conçu dans leurs classes en situation réelle, avec l'accord de leurs chefs d'établissement (un en zone rurale et un en ville).

1.3.2.2 Les élèves

Au total, 7 classes ont participé à ces expérimentations, 4 classes sur 6 séances pour un enseignant (A) et 3 classes sur 4 séances pour le second (B), soit 158 élèves en tout. Des autorisations d'enregistrement audio et vidéo des élèves ont été signées par les parents d'élèves et garantissaient l'anonymat des données collectées à usage de recherche.

1.3.3 Matériel

Des tables interactives ont été installées dans les établissements des enseignants concepteurs, avec l'application tangible développée et des sets d'objets tangibles pour chacune d'elle.

Dans l'établissement de l'enseignant A, une salle a été spécialement attribuée, ce qui a permis d'installer 5 tables interactives. En plus du vidéoprojecteur habituellement utilisé par l'enseignant pour afficher du contenu au tableau à partir de son ordinateur, un vidéoprojecteur supplémentaire a été utilisé afin de projeter ce qui était affiché sur une des tables interactives, lorsque c'était nécessaire.

Pour l'enseignant B, 2 tables interactives ont été installées dans sa salle de cours habituelle. Outre le vidéoprojecteur et l'ordinateur déjà présents dans la salle, l'enseignant a utilisé une flexcam qui pouvait filmer l'écran d'une table interactive. La flexcam était reliée à l'ordinateur et permettait à l'enseignant de projeter à la fois ce qui était affiché sur l'écran, mais également les objets tangibles et les manipulations de l'utilisateur en zoomant sur ce qui l'intéressait.

1.3.4 Données recueillies

Dans chaque classe, 3 caméras ont été placées selon différents angles (cf. Figure 18) afin, notamment, d'outiller la confrontation collective qui sera présentée plus loin. Une caméra était orientée vers l'écran d'une table interactive, une autre était centrée sur un groupe

d'élèves afin d'enregistrer les interactions entre eux et avec l'artefact et une dernière était placée au fond de la salle afin d'enregistrer l'activité en classe dans son ensemble et d'avoir une vision globale des élèves et de l'enseignant.



Figure 18. Exemples de données vidéo recueillies en classe par 3 caméras avec des points de vue différents dans la classe de l'enseignant A

Des observations ont été menées par un ergonome afin de relever le déroulement temporel des cours, les difficultés rencontrées par les élèves ou l'enseignant ou les imprévus.

Chaque semaine, après les cours, un entretien était réalisé avec l'enseignant afin de le débriefer à chaud sur son activité et pour discuter des améliorations possibles au niveau de l'artefact et des scénarios afin de favoriser la *conception dans l'usage* (Folcher, 2003). Ces entretiens étaient menés à partir d'une trame et des résultats des observations de l'ergonome.

À ces occasions, des modes opératoires de l'enseignant pouvaient évoluer, voire émerger, afin d'être mis à l'épreuve d'une semaine à l'autre. L'enseignant était invité à explorer les usages possibles de la technologie et à prendre de la distance par rapport au « prescrit » des scénarios pédagogiques élaborés lors des réunions de conception. Un résultat notable de cette exploration a résidé dans l'utilisation de l'application tangible de simulation lors de l'évaluation notée de fin de séance d'un des enseignants, alors que cet usage n'avait pas été discuté préalablement avec le groupe de travail en réunion.

1.3.5 Récapitulatif des expérimentations en classes

Le tableau 7 présente une synthèse des expérimentations en classe concernant les participants et le matériel utilisé. Bien que l'objectif de ces expérimentations ait été d'alimenter la conception, elles ont également permis d'identifier des apports et des limites des solutions de conception pour l'enseignement (Knibbe, Falzon, Lémonie & Mégard, 2015). Ces derniers

ont ainsi permis de valider ou de rejeter certaines hypothèses de conception par la confrontation à réalité.

Enseignant	Nombre de tables interactives	Projection de l'application tangible	Nombre de séances	Classe	Nombre d'élèves
A	5	Vidéoprojecteur branché directement sur une table interactive	6	A1	22
				A2	19
				A3	21
				A4	19
B	2	Flexcam reliée à l'ordinateur de l'enseignant	4	B1	24
				B2	26
				B3	27

Tableau 7. Récapitulatif des expérimentations en classes avec les tables interactives

1.4 Synthèse du processus de conception global

La démarche de conception est synthétisée dans la figure ci-dessous. Les articulations entre les trois parties précédentes, c.-à-d. les réunions de conception participative, les travaux effectués entre ces réunions et les expérimentations en classes, y sont décrites. On y retrouve des caractéristiques de modèles existants en ergonomie de conception, par exemple :

- le cycle de conception centrée utilisateur décrit dans le chapitre 3 (Maguire, 2001), avec la boucle qui intègre les l'analyse des besoins des enseignants, les réunions de conception, la production de solutions et les évaluations en classe.
- la boucle de la conception décrite dans l'approche instrumentale (Rabardel, 1995) entre les réunions de conception, la production de solutions et les expérimentations en classe.

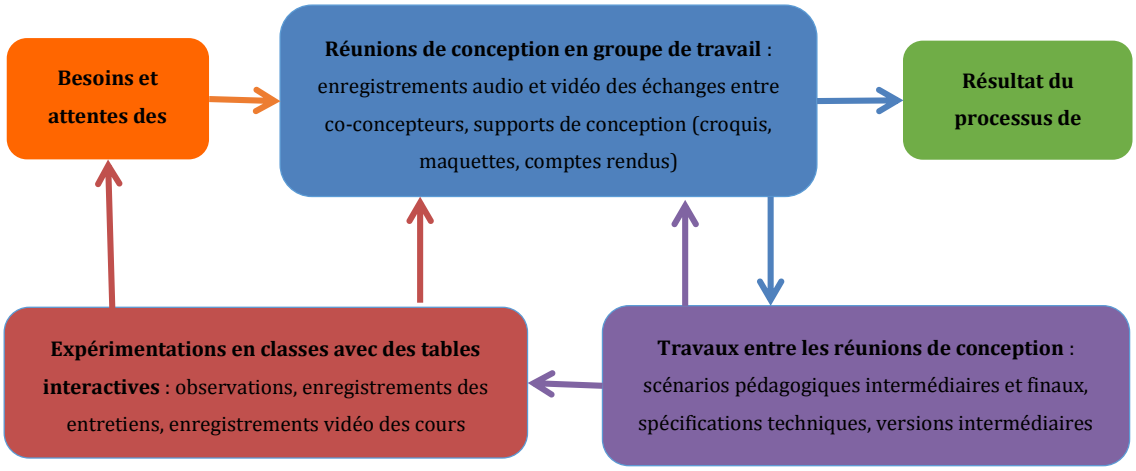


Figure 19. Résumé de la démarche de conception

1.5 Bilan sur les méthodes de conception au regard de la problématique

Sur les 4 méthodes que nous considérons, le *cadrage du champ des possibles* a été présenté dans les deux chapitres précédents. Les 3 restants ont été introduits dans cette présentation de l'aspect méthodologique de la démarche de conception :

- la construction conjointe du système technique et des pratiques d'enseignement dans l'objectif général des réunions de conception ;
- l'implication de futurs utilisateurs dans la présentation des participants selon leurs différents rôles :
  - enseignants pionniers : les participants étaient des experts en conception de ressources pédagogiques censés mettre en œuvre les produits de la conception dans leur activité d'enseignement ;
  - co-concepteurs : ils participaient à part entière aux décisions de conception relatives à l'adaptation des scénarios pédagogiques existants et à la définition de l'application tangible, jusqu'au niveau des spécifications techniques de celle-ci.
- La confrontation de leurs hypothèses de conception dans les phases expérimentales en classes avec les résultats de la conception et, indirectement, dans la réalisation des objets intermédiaires.

Il est cependant nécessaire de détailler davantage l'ensemble de la démarche de conception afin de pouvoir caractériser ces différentes méthodes et leurs effets sur l'articulation entre l'intégration des solutions de conception et les innovations rendues possibles par celles-ci. Pour cela, le chapitre suivant propose d'identifier des phases en conception, correspondantes à des classes de situations pour lesquelles le rôle de chaque méthode de conception serait plus clairement identifiable.

2 Résultats productifs de la conception

Cette partie présente le couple *application tangible - scénarios pédagogiques* résultant de l'activité de conception. Cependant, en dehors des expérimentations en situation réelle, ces résultats n'ont pas fait l'objet d'une évaluation plus approfondie dans le cadre du travail de

thèse. Par conséquent, lorsque nous discutons des apports de ces résultats pour l'enseignement ou l'apprentissage, ou de leur caractère « intégré » et « innovant », nous faisons référence aux hypothèses de conception. Concrètement, il s'agit des effets attendus par les concepteurs lorsqu'ils ont formulé des choix de conception relatifs à l'application tangible ou aux scénarios pédagogiques.

2.1 L'application tangible de simulation en optique

L'application tangible développée permet de représenter des expériences sur les phénomènes lumineux étudiés en 4e sur la décomposition de la lumière par le biais d'interactions tangibles et tactiles sur une table interactive. Deux niveaux de représentation sont proposés : un niveau de « simulation tangible » et un niveau de modélisation de cette simulation.

2.1.1 La simulation tangible

La simulation tangible consiste à simuler des expériences avec des objets tangibles. Ces derniers représentent les éléments constitutifs des expériences réalisées par les élèves lorsqu'ils observent une source lumineuse, primaire ou secondaire, avec un spectroscope. La simulation est allo-centrée en cela qu'un objet tangible représente l'observateur « à la troisième personne ». Les objets tangibles se composent d'un objet physique, réel, et une image virtuelle associée, affichée sur l'écran de la table interactive comme le montre la figure 20.



Figure 20. Exemple d'objets tangibles

Voici la liste des objets tangibles disponibles dans la simulation :

- un œil tangible qui représente le point de vue de l'observateur ;
- un spectroscope réel muni d'un pied lui permettant d'être positionné sur la table ;
- des sources primaires tangibles (le soleil, une ampoule, un néon et une bougie) ;
- des objets opaques colorés tangibles (bleu, vert, rouge, noir, blanc) ;
- des filtres colorés tangibles (bleu, rouge, vert).

Sous chaque objet tangible était collé un « tag » permettant à la table interactive de le détecter lorsqu'il était posé dessus. On distingue deux types d'objets tangibles selon qu'ils soient « spécifiques » ou « génériques » :

- les objets tangibles spécifiques ont un rôle unique et figé dans le temps et sont associés à une image définie ;
- les objets tangibles génériques ont plusieurs rôles : à l'aide d'un bouton tactile, il est possible de modifier l'image affichée sous l'objet physique et ainsi, sa fonction dans la simulation.

Pour les sources primaires, les objets opaques colorés et les filtres colorés, les deux types d'objets tangibles ont été conçus. Par exemple, 4 objets opaques colorés ont été conçus : 3 spécifiques et un générique (Figure 21). Ainsi, les produits de la conception exploitent le concept d'objets tangibles physiques associés à des images affichées sur l'écran de la table interactive et à des boutons tactiles, ainsi que la possibilité d'avoir différents types d'objets tangibles, c.-à-d. génériques ou spécifiques. Du point de vue des usages, ces différents objets offrent des alternatives différentes pour l'enseignant, à choisir selon ses besoins.

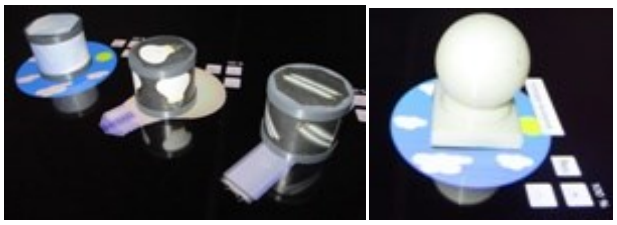


Figure 21. Exemples de sources de lumière spécifiques (à gauche) et générique (à droite)

L'application tangible permet d'afficher des observations idéales des phénomènes simulés. Pour cela, la configuration spatiale des objets tangibles doit répondre à des conditions, en termes position et d'orientation relatives, similaires aux contraintes des expériences réelles. Afin de rendre compte de ce que perçoit virtuellement l'œil tangible, une fenêtre affiche à côté de lui une image de « ce que voit l'œil » en fonction de son orientation. Par exemple, s'il est dirigé vers une source lumineuse, une image de cette source sera affichée dans la fenêtre.

De plus, pour simuler l'observation du spectre de la lumière du soleil, il faut que :

- l'œil, le spectroscope et une source lumineuse tangibles soient alignés ;
- l'œil soit orienté vers la source ;

- le spectroscope soit placé correctement devant l'œil.

Ces caractéristiques techniques ont été définies pour assurer la cohérence entre expérience réelle et simulation afin de tenir compte des lois sur le trajet rectiligne de la lumière selon la position et l'orientation des objets tangibles. Pour la pratique de l'enseignant, cela lui permet également de revenir sur des notions vues précédemment par les élèves, mais pas toujours maitrisées, par exemple le trajet rectiligne de la lumière.

La figure 22 illustre ces conditions et montre qu'une image de spectre lumineux est affichée devant l'œil. Le spectre représente de façon idéale l'observation qui serait faite par un expérimentateur avec un spectroscope dans la réalité. En revanche, si l'œil n'est pas dirigé vers la source, rien ne s'affiche, car il ne « voit » rien.

Selon le type de source, le spectre varie : il est continu pour la lumière du soleil, de l'ampoule ou de la bougie et discontinu pour celle du néon. Les spectres affichés dépendent du type de source afin d'assurer encore une fois la cohérence avec l'expérience réelle. Ces différentes sources représentent par ailleurs un enrichissement des contenus à enseigner par rapport à l'existant, car il ne dispose habituellement pas de chacune d'elles dans l'expérience réelle.

Le spectre lumineux affiché peut être de deux types :

- par défaut, plusieurs ordres du spectre sont affichés, comme lors de l'observation réelle à travers un spectroscope ;
- cependant, à l'aide d'un bouton tactile associé à l'objet tangible spectroscope, il est possible de passer de plusieurs ordres à un seul ordre du spectre (Figure 22).

La figure présente différentes situations de simulation : un cas de non-alignement de l'œil et de la source, la simulation de l'observation du ciel, la simulation de l'observation d'un néon et l'affichage d'un seul ordre du spectre.

Cela représente un apport pour l'activité de l'enseignant, car cette transition, de l'observation de plusieurs ordres vers un seul spectre, était généralement implicite ou peu discutée. Avec cette fonction, il peut la justifier plus facilement et s'assurer que tous les acteurs de la classe aient le même objet d'étude.



Figure 22. Exemple de simulation de l'observation du spectre de la lumière du soleil et d'un néon

L'application tangible conçue permet également de simuler l'observation d'un objet opaque coloré avec ou sans spectroscope. L'œil et, le cas échéant, le spectroscope doivent être alignés et orientés vers un objet opaque coloré et une source primaire doit être placée sur la table de sorte que l'objet opaque réfléchisse virtuellement la lumière reçue. La figure 23 illustre cela par quatre exemples : en haut, la simulation de l'observation d'objets opaques colorés rouge et vert éclairés en lumière blanche ; en bas, la simulation lorsque la lumière ne peut pas arriver jusqu'à l'œil.

Lorsqu'un filtre tangible est placé entre une source lumineuse et l'œil, il absorbe une partie de la lumière et la couleur de la source ou son spectre est modifié (figure 24). Il faut pour cela que les objets tangibles (source lumineuse, filtre, spectroscope éventuellement et œil) soient alignés.

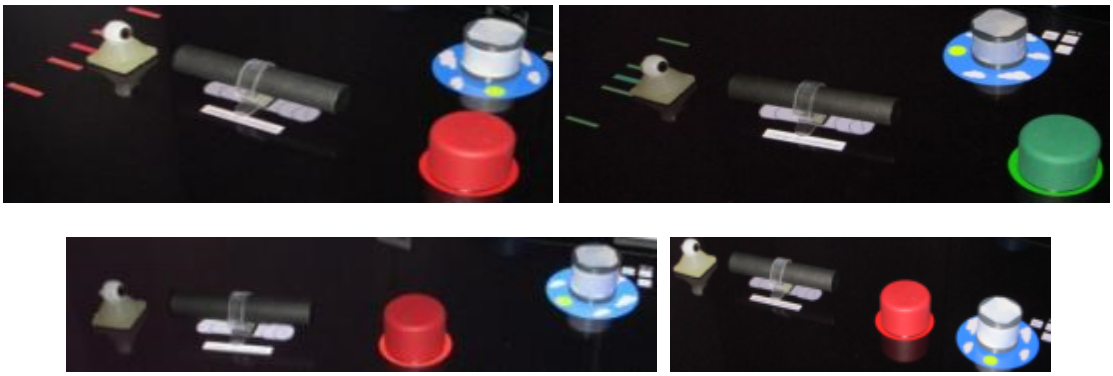


Figure 23. Exemples de l'observation simulée d'objets opaques



Figure 24. Simulation de l'observation de la lumière du soleil avec un spectroscope à travers un filtre bleu ou vert

L'application tangible permet de combiner filtres et objets opaques pour simuler le fait que la couleur d'un objet dépend de la couleur de la lumière. Ainsi, si par exemple un objet opaque vert est éclairé en lumière blanche ou verte (en utilisant un filtre vert), la simulation affiche une image de l'objet vert dans la fenêtre qui montre « ce que voit l'œil ». En revanche, si un objet vert est éclairé en lumière rouge ou bleue, il est censé absorber ces couleurs et l'œil ne verra donc rien. La figure suivante montre la simulation de l'observation de la lumière émise par un objet blanc éclairé en lumière verte (l'œil voit un objet vert) et d'un objet vert éclairé en lumière bleu (l'œil ne reçoit pas de lumière).

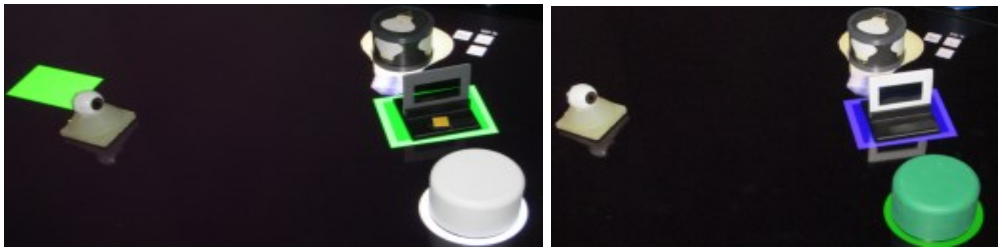


Figure 25. Exemples de l'observation simulée de sources lumineuses derrière des filtres

Enfin, comme dans l'expérience de la synthèse additive des lumières colorées, il est possible de placer jusqu'à trois sources lumineuses blanches avec, devant chacune, un filtre de couleur différente et un objet opaque blanc qui renvoie une lumière dont la couleur correspond à l'additivité des lumières qu'il reçoit. La figure suivante montre un cas de synthèse additive des lumières colorées avec des sources de lumière bleue et rouge reflétées sur un objet blanc qui sert d'écran.



Figure 26. Exemple de simulation de la synthèse additive des lumières colorées

Ainsi, afin d'assurer la conformité de l'application tangible de simulation aux contenus à enseigner prescrits par le programme scolaire, celle-ci permet de simuler des phénomènes optiques impliquant : des objets opaques colorés, des filtres colorés, leur combinaison ainsi que la synthèse additive. De plus, les possibilités offertes par les interactions tangibles permettent de faire travailler les élèves sur le trajet rectiligne de la lumière dans ces différents cas.

2.1.2 La modélisation associée à la simulation

Le second niveau de représentation que propose l'application tangible vise à modéliser les phénomènes physiques simulés avec les objets tangibles. Pour cela, un objet tangible « modèle » permet d'afficher une fenêtre dans laquelle des schémas représentent les éléments de la simulation et des rayons lumineux.

La figure suivante illustre différents cas de modélisation : en haut à gauche, la modélisation du rayon lumineux qui part d'une ampoule vers l'œil ; en haut à droite, la modélisation du spectre de la lumière reçue par un œil orienté vers une ampoule ; en bas à gauche, la modélisation de la simulation de la lumière reçue par un œil orienté vers un objet rouge éclairé en lumière blanche derrière un filtre vert (pas de lumière reçue) ; en bas à droite, la modélisation de la simulation de la lumière reçue par un œil orienté vers un objet blanc éclairé en lumière blanche derrière un filtre vert (l'œil ne reçoit que de la lumière verte)

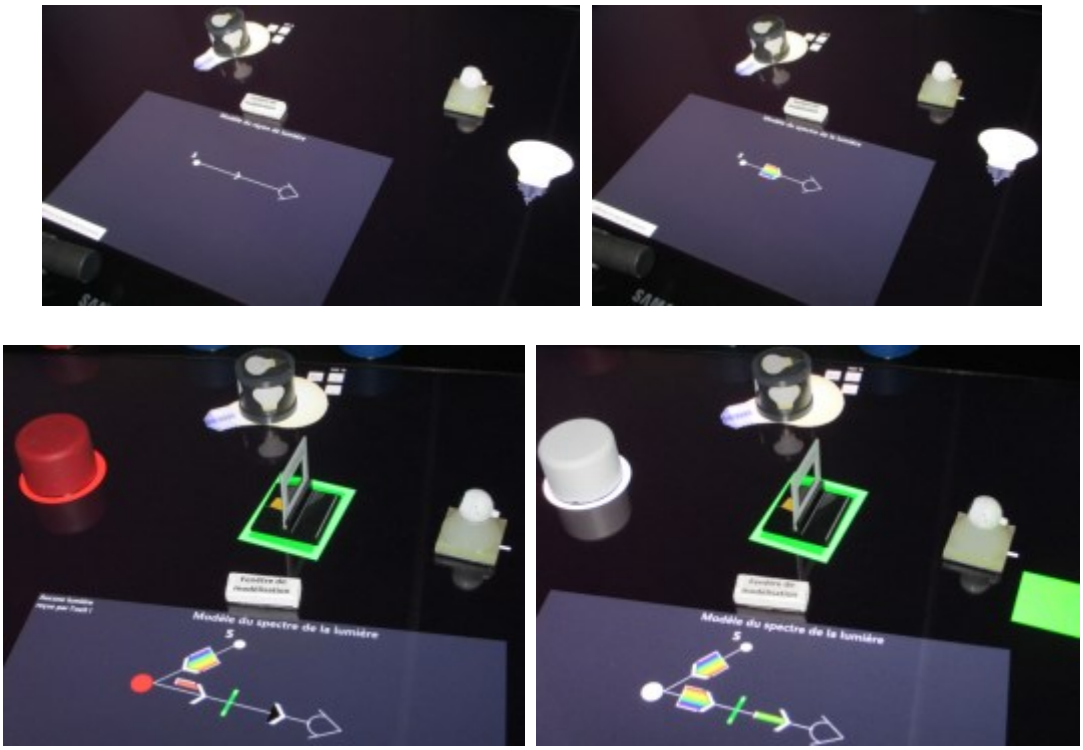


Figure 27. Exemples de modélisation de la simulation

La modélisation est dynamique dans la mesure où elle s'adapte lorsqu'un utilisateur interagit avec les objets tangibles de la simulation. Par exemple, si une source tangible est déplacée sur l'écran, le schéma correspondant l'est également dans la fenêtre de modélisation. Mis à part le spectroscope, chaque objet tangible de la simulation est associé à un schéma.

La fenêtre de modélisation permet d'afficher, au choix, un rayon lumineux seul ou un rayon lumineux sur lequel est superposé un spectre lumineux correspondant aux lumières colorées qui le composent. La transition entre ces deux niveaux de représentation se fait à l'aide d'un bouton tactile.

Du point de vue du potentiel technique des tables interactives, la possibilité d'afficher sur l'écran de la table interactive des images différentes selon l'agencement (position et orientation) de plusieurs objets tangibles ou en fonction d'interactions tactiles a donc largement été mobilisée. Un objet tangible a d'ailleurs nécessité le report de l'écran entier dans une fenêtre proposant des représentations différentes de façon dynamique (le cadre de modélisation).

2.1.3 Les autres fonctions de l'application tangible

Indépendamment des deux niveaux de représentation, c.-à-d. la simulation et la modélisation, des fonctions ont été développées afin de :

- figer l'état de certains objets tangibles, concernant par exemple l'état des objets génériques, le type de spectre affiché devant l'œil (un ou plusieurs ordres) et le type de modélisation (rayon lumineux seul ou avec spectres) et en retirant les boutons tactiles associés ;
- réinitialiser ces objets tangibles à leur état par défaut ;
- enregistrer la position et l'orientation des objets tangibles sur l'écran de la table interactive et les charger plus tard en affichant le nom des objets tangibles à placer et leur orientation sur l'écran pour qu'un utilisateur puisse les disposer tels qu'ils ont été sauvegardés ;
- quitter l'application.

Ces fonctions sont associées à un objet tangible « menu » autour duquel sont affichés des boutons tactiles qui permettent d'utiliser chaque fonction. Elles visent à faciliter l'intégration de l'application tangible en offrant à l'enseignant des moyens de gérer l'activité des élèves, p. ex. leur avancement ou la transition entre les sous-tâches du TP-cours.

En outre, des messages d'aide ont été définis pour guider l'utilisateur. Par exemple, si l'œil est trop loin du spectroscope, aucun spectre ne peut apparaître et un message l'indique aux utilisateurs. Ces éléments de guidage visent à faciliter la manipulation et la compréhension de l'interface, dans un souci d'intégration dans les activités d'enseignement et d'apprentissage.

2.2 La séquence d'enseignement reformulée pour intégrer l'artefact

L'ensemble de la séquence d'enseignement de l'optique en 4^{e} comptait sept TP-cours (décrits dans le chapitre précédent). Les scénarios pédagogiques de quatre d'entre eux ont été retravaillés afin d'intégrer l'application tangible : les TP-cours 2, 3, 4 et 6.

Globalement, le découpage des TP-cours existants a été modifié par l'ajout d'une sous-tâche sur table interactive consécutive aux expériences réalisées par les élèves. Les élèves travaillent en groupes de quatre, dans un premier temps sur la simulation des phénomènes physiques dont ils ont fait l'expérience, puis sur leur modélisation lorsque l'enseignant leur donne l'objet tangible correspondant. La consigne les invite généralement à « rejouer » les expériences avec ces autres formes de représentation. L'objectif est de les amener à :

- comparer leurs observations réelles avec celles, idéales, proposées par l'application tangible ;
- en discuter entre eux pour comprendre les principes physiques sous-jacents grâce à la modélisation ;
- noter sur leurs cahiers leurs observations et leurs interprétations, en particulier lors de la modélisation.

Ces tâches d'apprentissage renvoient à des usages nouveaux rendus possibles par les résultats de la conception. Ils permettent de dépasser certaines limites dues aux biais expérimentaux ou aux difficultés d'interprétation des phénomènes réels au niveau des modèles physiques par les élèves.

Pendant que les élèves réalisent ces tâches d'apprentissage, l'enseignant est censé intervenir dans les groupes pour guider les élèves, favoriser le débat, les interroger et insister sur des notions discutées en réunions.

La sous-tâche existante de « réponse collective », dans laquelle l'enseignant revient sur les expériences des élèves afin de les synthétiser et de créer un débat avec la classe a été enrichi avec par l'utilisation l'application tangible par l'enseignant. Elle lui permet d'illustrer son discours lors du débat avec la classe, de reproduire les cas qu'il a observé, qui ont posé problème, ou qui sont importants d'un point de vue didactique. Le contenu de l'application tangible peut pour cela être projeté au tableau à l'aide d'un vidéoprojecteur relié à la table interactive, ou d'une flexcam braquée sur l'écran et reliée à l'ordinateur de l'enseignant.

En termes de contenus enseignés, les TP-cours retravaillés proposent des formes de représentations inédites, extraites du niveau de modélisation dans l'application tangible. Des captures d'écran sont intégrées aux scénarios pédagogiques dans le bilan affiché par l'enseignant, que les élèves doivent recopier.

Dans le cadre des expérimentations réalisées dans les classes des enseignants concepteurs, deux versions des scénarios ont été rédigées : une pour chaque enseignant en fonction des caractéristiques de sa situation, en particulier concernant les contraintes matérielles et temporelles. Elles sont cohérentes du point de vue des contenus enseignés, mais diffèrent dans les méthodes d'enseignement de ces contenus :

- dans un cas « idéal », le scénario est prévu pour une classe équipée de 5 tables interactives et l'application tangible est intégrée dans l'évaluation notée de fin de séquence ;

- dans l'autre cas, plus « réaliste », seules deux tables interactives sont disponibles en classe, ce qui implique des roulements entre les groupes d'élèves et une gestion temporelle différente pour que tous les groupes manipulent l'application tangible.

Les scénarios finaux sont cristallisés dans les documents de cours distribués aux élèves à chaque début de TP-cours. Ces « documents élèves » reprennent la plupart des informations des scénarios des enseignants, en particulier sur le déroulement, les consignes et le matériel expérimental. Une version commentée de ces documents réservée à l'enseignant le guide dans la mise en œuvre du TP-cours.

Enfin, pour un des enseignants, l'évaluation notée des connaissances en fin de séquence a également été adaptée pour intégrer l'application tangible de simulation. Les élèves disposaient alors d'une image incomplète du modèle de la simulation, avec une source lumineuse ainsi que des objets opaques et des filtres de différentes couleurs. Il leur était demandé d'utiliser la simulation tangible pour décrire les lumières colorées reçues par l'œil en justifiant leur réponse.

3 Liens entre produits de la conception et processus d'intégration et d'innovation

En considérant ces résultats productifs de la conception, nous pouvons répondre à notre première question de recherche :

- En quoi les solutions de conception rendent-elles compte de processus d'intégration d'une TICE dans des pratiques d'enseignement, et inversement, et les processus d'innovation dans ces pratiques et par rapport au potentiel technologique ?

Pour cela, le tableau 8 synthétise les éléments de la partie précédente qui montrent que le couple *application tangible - scénarios pédagogiques adaptés* résulte des quatre processus décrits dans la problématique, à savoir :

- (A) : adaptation du système technique aux pratiques et aux besoins des enseignants ;
- (B) : adaptation des pratiques des enseignants aux contraintes du système technique ;
- (C) : innovation technique par rapport au potentiel des tables interactives ;

- (D) : innovation et apports dans les pratiques des enseignants par rapport à leur activité actuelle.

(A) Adaptation du système technique aux pratiques et aux besoins des enseignants	**(B) Adaptation des pratiques des enseignants aux contraintes du système technique**
- Caractéristiques techniques définies pour assurer la cohérence entre expérience réelle et simulation ; - Conformité de l'application tangible de simulation aux contenus à enseigner prescrits par le programme scolaire en permettant de simuler de phénomènes en optique habituellement abordés - Fonctions disponibles pour faciliter la dimension pédagogique de l'activité de l'enseignant pour réinitialiser, quitter ou figer l'application tangible ; - Ajout d'éléments de guidage pour les utilisateurs sous forme de messages d'aide.	- Modification de 4 des 7 scénarios pédagogiques existants pour la séquence d'optique par l'ajout d'une sous-tâche en groupe sur l'application tangible ; - Modification de l'évaluation de fin de séquence en introduisant l'application tangible ; - Rédaction de deux versions des scénarios pédagogiques, adaptées aux contextes de chaque enseignant concepteur.
(C) Innovation technique par rapport au potentiel des tables interactives	**(D) Innovation dans les pratiques des enseignants par rapport à leur activité actuelle**
- Utilisation d'objets tangibles physiques, porteurs de métaphores, associés à des images affichées sur l'écran de la table interactive et à des boutons tactiles ; - Exploitation du potentiel des objets tangibles en proposant des objets spécifiques ou génériques ; - Possibilité d'afficher des images différentes selon l'agencement (position et orientation) de plusieurs objets tangibles et en fonction d'interactions tactiles ; - Utilisation d'un objet tangible pour le report de l'écran entier dans une fenêtre proposant, de façon dynamique, des représentations différentes des éléments de la simulation.	- De nouvelles modalités d'enseignement offrant des possibilités d'usages alternatifs, par exemple pour aborder des notions clés, illustrer le discours de l'enseignant ou évaluer l'apprentissage des élèves avec l'application tangible de simulation ; - Du point de vue des élèves, de nouvelles tâches d'apprentissage sont disponibles, proposant des observations collectives et idéales ; - Enrichissement des contenus à enseigner en les diversifiant et en proposant de nouvelles formes de représentation ; - Dépassement de limites existantes concernant les biais expérimentaux, l'interprétation de l'expérience réelle par le modèle ; - Projection du contenu de l'écran de la table interactive à l'aide d'un vidéoprojecteur.

Tableau 8. Résumé des caractéristiques des résultats de la conception par rapport aux processus d'intégration/innovation

Le processus (A) fait référence aux caractéristiques de l'application tangible permettant de répondre à des besoins identifiés dans le chapitre 6. Ces besoins concernent par exemple :

- les contenus à traiter avec l'application tangible, qui devaient correspondre à ceux prescrits par le programme scolaire ;

- le besoin de rigueur et de cohérence dans les représentations des phénomènes physiques ou de leur modélisation ;
- le besoin de conserver certaines sous-tâches de la démarche d'investigation préconisée par le programme scolaire.

Le processus (B) traite des modifications qu'il a fallu apporter aux scénarios existants pour permettre l'intégration de l'application tangible dans les pratiques de l'enseignant. Ces modifications font écho, pour la plupart, aux besoins relevés dans le chapitre 6, relatifs à la structure existante de la séquence d'optique et des TP-cours.

Le processus (C) rend compte de l'exploitation du potentiel de la technologie émergente à partir :

- des résultats de l'étude prospective présentée dans le chapitre 5, sur les caractéristiques potentiellement intéressantes de ces technologies pour l'enseignement : les objets tangibles en général et le grand écran de la table interactive.
- des éléments théoriques du chapitre 3 sur les tables interactives, les interfaces tangibles et les fonctions techniques qu'elles proposent (p. ex. Kubicki, 2011 ; Fishkin, 2004 ; Ishii & Ullmer, 1997). Ils portaient par exemple sur le principe de détection d'objets posés sur l'écran de la table interactive, la possibilité d'afficher des informations sur cet écran, la manipulation directe par les utilisateurs ou les métaphores liées aux objets tangibles.

Le processus (D) correspond aux formes d'améliorations des pratiques de l'enseignant, indépendamment des questions d'intégration, de faisabilité ou d'adaptation de ces apports. Les résultats des chapitres 3, 5 et 6 sont mobilisés afin de souligner les caractéristiques des produits de la conception qui résultent de ce processus. Ainsi les usages généraux relevés dans la littérature (p. ex. Benko & al., 2009 ; Chaboissier, 2012) ou les usages anticipés des tables interactives ont été repris afin d'améliorer l'enseignement de l'optique. Ils concernaient en particulier la simulation de phénomènes réels et les tâches collaboratives. De plus, certains modes opératoires prévus visaient à dépasser des difficultés et des limites existantes, tels que les biais expérimentaux ou les difficultés rencontrées par les élèves.

Pour conclure, nous avons donc montré que les produits de la conception rendent compte de l'articulation des 4 processus relatifs à l'intégration de ces produits ou aux innovations qu'ils peuvent porter.

La méthode de cadrage du champ des possibles a participé à cette démonstration grâce aux besoins et aux usages potentiels des tables interactives relevés en amont de la conception. Plusieurs d'entre eux se sont en effet retrouvé dans les caractéristiques du couple *application tangible – scénarios pédagogiques adaptés* finaux.

Cependant, des aspects du couple *application tangible - scénarios pédagogiques adaptés* relatifs aux résultants de processus d'intégration et d'innovation n'ont pas de lien direct avec les éléments théoriques ou empiriques relevés dans les chapitres précédents. C'est notamment le cas des éléments de guidage pour les utilisateurs (A), de l'adaptation des évaluations notées (B & D), des fonctions complexes du cadre de modélisation (C) ou des nouvelles tâches d'apprentissage ainsi que des nouveaux contenus à enseigner (D). Ces éléments sont apparus avec l'avancement de la conception : les attentes des futurs utilisateurs ont évolué dans le temps (Lindgaard & al. 2006) au fur et à mesure que la solution s'affinait.

4 Synthèse des résultats et intérêts d'une étude longitudinale de la conception

Afin de discuter des résultats de la conception, nos analyses se sont appuyées sur trois sources :

- nos recherches bibliographiques sur les TICE et sur les tables interactives ;
- une étude prospective sur l'anticipation des usages des tables interactives dans des activités d'enseignement et d'apprentissage ;
- une analyse des besoins dans l'enseignement de la physique-chimie au collège.

Parmi ces trois sources, les deux dernières appartiennent au « cadrage du champ des possibles » défini dans le chapitre 4. Cette méthode a donc participé à la « qualification » des produits de la conception comme résultants des quatre types de processus d'intégration/innovation..

Cependant, elle informe peu sur l'articulation entre ces processus lors de la conception. Cela est également vrai pour les autres méthodes de conception que nous étudions : la construction conjointe du système technique et des pratiques enseignantes, l'implication des futurs utilisateurs et la confrontation de leurs hypothèses de conception. En effet, s'ils ont été

introduits dans la description de la méthode générale de conception, leur impact sur les solutions produites n'apparaît pas directement. Par conséquent, une analyse longitudinale de la conception de ces solutions semble nécessaire pour discuter de l'effet de ces méthodes sur notre objet d'étude.

Le chapitre suivant propose pour cela une décomposition de l'activité de conception afin d'identifier des phases distinctes. Celles-ci permettront d'outiller l'analyse longitudinale des choix de conception en les situant par rapport aux méthodes de conception que nous étudions au regard des processus d'intégration/innovation et d'apprentissage.

Chapitre 8 ANALYSE DES LIENS ENTRE METHODES DE CONCEPTION ET PROCESSUS D'INTEGRATION, D'INNOVATION ET D'APPRENTISSAGE

À partir des spécificités du sujet de ce travail de thèse, c'est-à-dire. la conception de TICE sur technologie émergente, les éléments bibliographiques présentés dans les chapitres 2 et 3 ont permis d'identifier quatre processus importants dans notre démarche de conception :

- l'adaptation du système technique aux pratiques et aux besoins des enseignants ;
- l'adaptation des pratiques des enseignants aux contraintes du système technique ;
- l'innovation technique par rapport au potentiel des tables interactives ;
- l'innovation et apports dans les pratiques des enseignants par rapport à leur activité actuelle.

Les chapitres théoriques ont mis en avant la présence d'apprentissages en conception ainsi que quatre caractéristiques méthodologiques pouvant jouer sur l'articulation entre ces processus :

- la construction conjointe du système technique et des pratiques enseignantes ;
- l'implication de futurs utilisateurs ;
- la confrontation de leurs hypothèses de conception ;
- le cadrage du champ des possibles.

Les chapitres empiriques précédents ont introduit ces caractéristiques méthodologiques, tout en présentant le contexte des activités de conception mises en œuvre dans le cadre du projet Tactileo. De plus, le chapitre précédent a montré en quoi le couple *application tangible – scénarios pédagogiques* conçus résultait des quatre processus de conception que nous avons identifiés. Cependant, les liens entre les méthodes et les apprentissages en conception et les processus de d'intégration et d'innovation restent à démontrer.

Ce chapitre s'intéresse donc aux questions suivantes :

- En quoi les caractéristiques méthodologiques ont-elles permis d'articuler les processus d'intégration et d'innovation ?
- En quoi les caractéristiques méthodologiques permettent-elles d'engager des apprentissages chez les enseignants concepteurs ?
- En quoi ces apprentissages influent-ils sur l'articulation entre les processus d'intégration et d'innovation ?

Afin de répondre à ces questions, ce chapitre propose une analyse longitudinale des traces productives de la conception relatives à certaines composantes du couple *application tangible – scénarios pédagogiques*.

1 Grille d'analyse de l'activité des concepteurs

1.1 Rappel sur la structure des hypothèses de conception

Dans le chapitre 2, nous avons caractérisé les hypothèses de conception selon trois composantes. Adaptées à notre objet d'étude, elles prennent la forme suivante :

- Les *caractéristiques* des activités d'enseignement et d'apprentissage existantes, de l'activité de conception antérieure et de la nouvelle technologie ;
- Les *choix* de conception relatifs aux caractéristiques du couple *application tangible – scénarios pédagogiques* à définir ;
- Les *effets* attendus de ces choix de conception sur l'activité future.

Une hypothèse de conception prend alors la forme suivante : « en considérant telle(s) *caractéristique (s)*, tel *choix de conception* devrait aboutir à tel(s) *effet(s)* ». La structure de ces hypothèses de conception permettra d'outiller l'analyse des échanges productifs entre concepteurs.

1.2 Décomposition de l'activité de conception

Nous proposons d'identifier des classes de situations, que nous appellerons *phases*, dans lesquelles l'activité des concepteurs présente une certaine homogénéité selon les caractéristiques suivantes :

- les objectifs des différentes réunions ;

- leurs résultats productifs (p. ex. les spécifications de l'application, les différentes versions des scénarios pédagogiques ou les compte rendus d'expérimentation en classe) ;
- les supports mobilisés (p. ex. les objets intermédiaires, les supports de présentation ou les maquettes) ;
- les techniques de conception déployées (p. ex. les simulations, les expérimentations en classe ou l'allo-confrontation collective [Mollo & Falzon, 2004]).

1.3 Intérêt pour la caractérisation des méthodes de conception

La décomposition de l'activité de conception en phases peut instruire nos analyses à plusieurs niveaux :

- Leurs *résultats des phases* peuvent mettre en avant les caractéristiques méthodologiques de construction conjointe du système technique et des pratiques enseignantes selon qu'il s'agisse de nouvelles spécifications techniques, des scénarios adaptés ou une combinaison des deux. De plus, certains résultats productifs, c.-à-d. les attentes, les exigences et les spécifications, peuvent également informer sur les **rôles des participants**. Par exemple, si les attentes et les exigences peuvent correspondre à ce qu'ils souhaiteraient pour leur activité future, en tant qu'enseignants pionniers, les spécifications devraient renvoyer davantage à leur rôle de co-concepteur.
- les *supports* utilisés dans les réunions peuvent également informer sur la **construction conjointe** du système technique et des pratiques enseignantes, par exemple lorsqu'un démonstrateur, un prototype ou des scénarios pédagogiques existants sont mobilisés. À ce titre, le maquettage, les interactions avec les prototypes, la simulation de l'activité de l'activité future où la mise en œuvre en situation réelle peuvent illustrer les **formes de confrontation en conception**
- selon les *objectifs* de ces phases et les *techniques* déployées, le **rôle des participants** peut être éclairé. Par exemple, les contributions des enseignants de physique et de l'enseignante chercheuse en didactique ont pu varier selon que la phase vise à recueillir leurs attentes, anticiper la mise en œuvre des solutions en situation réelle ou améliorer les caractéristiques d'un prototype. De plus, les objectifs des phases peuvent rendre compte du rôle des éléments de **cadrage**, identifiés en amont de l'activité de conception participative, ont été réinjectés en conception afin de l'alimenter.

Les *choix de conception* autour desquels sont construites les hypothèses des concepteurs peuvent être catégorisées grâce aux trois dimensions du couple application tangible-scénarios pédagogiques à concevoir définies dans le chapitre 3 :

- la dimension *prescriptive* concerne les caractéristiques de la tâche relatives à l'exploitation de l'artefact en vue de mettre en œuvre les usages définis par les concepteurs
- la dimension *interactionnelle* porte sur les modalités d'interaction proposées à un utilisateur ;
- la dimension *physique* renvoie aux composants de l'artefact en termes de formes, de tailles ou de relations entre ces composants.

Par définition, ces trois *dimensions* proposées informent sur la caractéristique méthodologique de **construction conjointe** du système technique et des pratiques enseignantes. En outre, les choix de conception peuvent rendre compte de la prise en compte de ces éléments de **cadrage** selon leurs dimensions. Par exemple, des choix de dimensions interactionnelle ou physique peuvent illustrer la prise en compte des résultats de l'analyse prospective du chapitre 5 sur le potentiel technologique des tables interactives. Il en va de même pour ses usages, notamment dans le cas de la simulation d'expériences en physique.

Les trois types de *justifications des choix de conception* suivants peuvent informer sur différentes caractéristiques des méthodes de conception :

- Les *justifications relatives à des choix de conception antérieurs* concernant l'application tangible ou aux scénarios pédagogiques peuvent illustrer les interactions entre les dimensions lors de la **construction conjointe** du système technique et des pratiques enseignantes. Elles peuvent également informer sur la **confrontation des hypothèses** des concepteurs, en particulier lorsqu'elles renvoient à des **objets intermédiaires ;**
- Les *justifications correspondant aux caractéristiques de la technologie émergente* concernent par exemple ce qu'elle rend possible ou non en termes de représentation de l'information, de tâche d'apprentissage ou de support à l'enseignement. Compte tenu du caractère peu connu de la technologie, nous faisons le postulat que les participants avaient peu de connaissances sur son fonctionnement et les modalités d'interaction qu'elle propose en amont de la conception. Les justifications de ce type peuvent donc rendre compte de formes **d'apprentissage** en conception. Le **cadrage** du champ des possibles

par les ergonomes, lors de la description du potentiel technologique, peut d'ailleurs jouer sur ces apprentissages ;

- Les *besoins* permettent de justifier ce que devra faire la technologie émergente. Ils font référence aux caractéristiques organisationnelles, techniques ou physiques de l'activité des futurs utilisateurs, à ses éléments structurants, tels que les ressources et les contraintes, et aux caractéristiques des futurs utilisateurs. Leur mobilisation peut donc rendre compte du **cadrage** de l'activité des concepteurs à partir de ces besoins (identifiés dans le chapitre 6). Enfin, ces besoins peuvent également informer sur les types de **processus d'intégration ou d'innovation** visés par les hypothèses de conception.

De plus, l'évolution des *justifications des choix de conception* peut également rendre compte de formes **d'apprentissage**. Certes, les *besoins* doivent correspondre aux connaissances existantes des différents participants concernant les activités d'enseignement et d'apprentissage sans TICE. Cependant, les concepteurs acquièrent également en conception des connaissances sur leur pratique (Sanchez & Monod-Ansaldi, 2015), sur la technologie émergente et sur le processus de conception en lui-même.

Nous reprendrons le modèle des TPACK afin de catégoriser ces *justifications* en termes de connaissances des participants dans une ou plusieurs des trois grandes dimensions suivantes : les connaissances liées au contenu disciplinaire, les connaissances liées aux pratiques pédagogiques et les connaissances liées à la technologie (Koehler & Mishra, 2005).

Enfin, les **processus d'intégration et d'innovation** devraient transparaître dans les *effets attendus et les justifications* des différents choix de conception, selon que ces derniers aient pour but : d'adapter les fonctions constituantes de l'application tangible aux pratiques et aux besoins des participants, d'adapter leurs modes opératoires aux tables interactives ou d'innover d'un point de vue technologique ou du point de vue de l'enseignement.

En conclusion, la notion *d'hypothèse de conception* et le *découpage du processus* décrit dans cette partie doivent nous permettre d'identifier et de discuter les rôles des **caractéristiques méthodologiques** de conception sur l'ensemble de la démarche mise en œuvre. De là, l'analyse des effets et des justifications des choix de conception permettra de les relier aux **processus d'innovation et d'intégration** et aux **apprentissages** en conception.

2 Stratégie d'analyse

D'un point de vue méthodologique, les analysent portent à la fois sur les verbalisations relatives aux hypothèses de conception et sur les traces de l'activité des concepteurs (documents de spécifications, supports, maquettes, etc.). Cependant, il apparaît peu concevable de prendre en compte l'intégralité de ces hypothèses en raison du volume de données qu'elle représente. C'est pourquoi nous avons sélectionné certaines composantes du couple *application tangible – scénarios pédagogiques* jugées représentatives ou importantes.

2.1 Sélection des composantes représentatives de la solution à analyser

Au regard des besoins identifiés dans le chapitre 6, une fonction principale a émergé vis-à-vis de la technologie émergente lors des premières réunions : exploiter la table interactive et les objets tangibles pour simuler des expériences réelles en optique avec des interactions tangibles. Les analyses ont abordé le rôle de la table interactives et des objets tangibles à travers les trois fonctions suivantes liées à cette fonction principale :

- permettre un enrichissement des pratiques actuelles d'enseignement de l'optique en ajoutant de nouvelles sources dans la simulation ;
- permettre l'étude des phénomènes simulés avec différents niveaux de représentation ;
- permettre à une classe entière de visualiser les interactions entre un utilisateur et l'application de simulation tangible.

Afin de rendre compte de l'activité de conception productive de façon représentative, trois composantes du couple *application tangible – scénarios pédagogiques* ont été retenues pour l'analyse longitudinale des traces de la conception. Elles ont été sélectionnées afin de rendre compte à la fois des attentes relevées vis-à-vis de la technologie (c.-à-d. les trois fonctions secondaires) et des dimensions décrites précédemment (prescriptive, interactionnelle et physique) : les sources lumineuses tangibles, le cadre de modélisation et la projection de l'interface au tableau.

Les deux premières composantes font a priori référence aux dimensions physiques et interactionnelles. La troisième doit renvoyer à des questions d'articulation de l'application tangible avec le matériel de l'enseignant à un niveau plus prescriptif. Les modifications des

scénarios pédagogiques existants, relatives à chacune des trois composantes, ont également été analysées. Elles visaient à rendre compte de la dimension prescriptive liée à l'évolution des trois composantes tracées.

L'analyse des différentes versions des supports et des documents résultant des réunions de conception, telles que les spécifications, les maquettes ou les comptes rendus, a permis de tracer l'avancement des trois composantes choisies.

2.1.1 Les sources lumineuses tangibles

Les *sources lumineuses* tangibles correspondent à un type d'objet tangible qui a évolué à de nombreuses reprises, en particulier au niveau de la forme des objets physiques et des images affichées sur l'écran de la table interactive (cf. figure 28).

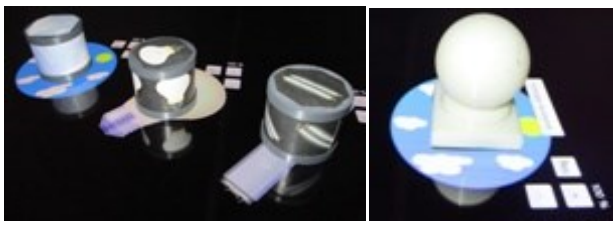


Figure 28. Exemples de sources de lumière spécifiques (à gauche) et génériques (à droite)

La source lumineuse tangible a dans un premier temps été un objet « générique », permettant d'afficher différents types de sources : soleil, ampoule ou néon. Sa forme devait être suffisamment symbolique pour être cohérente avec ces sources : une « boule » diffusante sur un socle. Par la suite, des sources lumineuses « spécifiques » ont émergé : une pour chaque type de source. Leur forme se voulait alors plus réaliste et proche de la forme réelle de chaque source (cf. Figure 29). Cependant, à la fin du processus, il a été décidé de leur donner une forme de cylindre sur lequel sont représentées les images des sources affichées par l'écran, afin de rendre plus cohérente la simulation de ce que « voit » l'œil tangible. Ces images ont quant à elles rapidement été spécifiées, mais plusieurs itérations ont été nécessaires pour trouver des images satisfaisantes. Les modifications apportées aux scénarios pédagogiques ont principalement porté sur leur introduction dans des étapes supplémentaires par rapport aux scénarios existants et le discours de l'enseignant.

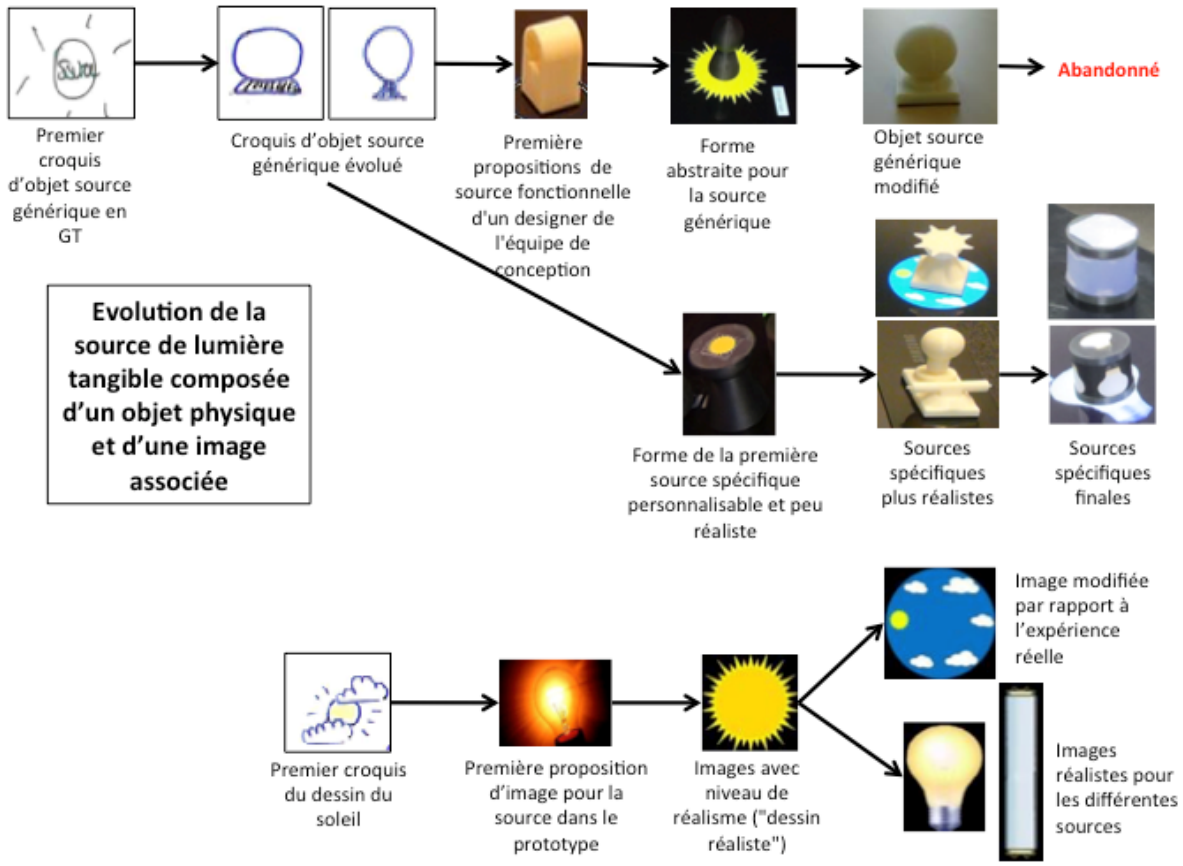


Figure 29. Évolution de la source de lumière tout au long des réunions de conception

2.1.2 Le cadre de modélisation

Le *cadre de modélisation* correspond à un objet tangible dont la composante virtuelle est une projection de la simulation sous forme de modèle (cf. Figure 30). Les représentations proposées par celle-ci ont été longuement discutées en réunion, notamment du point de vue de la compréhension des élèves, de leur rigueur par rapport aux modèles physiques existants et des modalités de transition entre les niveaux de représentation.

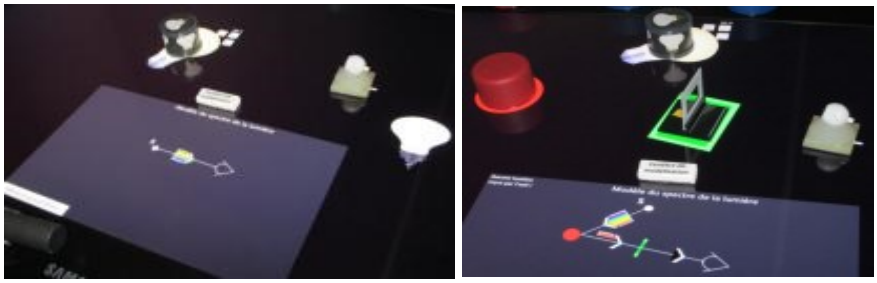


Figure 30. Exemples de modélisation de la simulation

Le cadre de modélisation a donné lieu à davantage d'itérations concernant les éléments à afficher dans le modèle, leurs représentations schématiques, les différents niveaux de représentation (un rayon seul ou avec un spectre lumineux) ou les modalités de transition (dimension interactionnelle) entre ces niveaux (cf. Figure 31). Les modifications apportées aux scénarios pédagogiques relatives au cadre de modélisation concernaient principalement

- leur introduction dans le cours suite à la simulation par les élèves ;
- le discours de l'enseignant et les tâches des élèves par rapport aux différents niveaux de représentation disponibles.

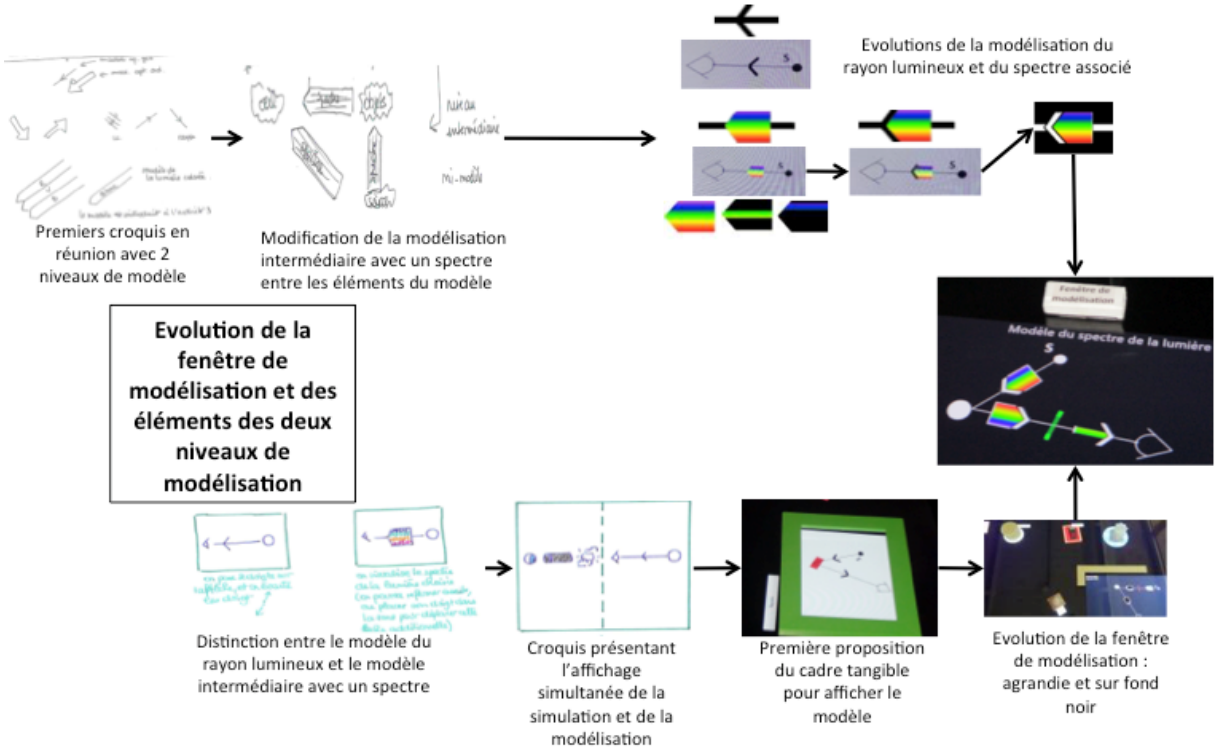


Figure 31. Évolution de la modélisation tout au long des réunions de conception

2.1.3 La projection de l'interface

La *projection de l'interface* au tableau fait référence à des questions d'intégration de l'artefact dans la classe, ainsi qu'à l'attente relative à la visualisation par toute une classe de ce qui est sur une table interactive. Les choix de conception relatifs à cette composante faisant principalement référence à une dimension prescriptive, il est moins aisé de les illustrer. D'un point de vue opérationnel, les choix de conception concernant cette composante ont principalement porté sur

- le matériel nécessaire pour la projection en elle-même (vidéoprojecteur ou flexcam) ;
- ce qui allait être projeté en termes d'images (celles des objets tangibles et de la modélisation) ;
- la place du vidéoprojecteur dans la classe ;
- l'intérêt de la projection dans les phases de restitution collective en fin de TP-cours, par l'enseignant ou les élèves, et pour corriger les devoirs de ces derniers.

2.2 Décomposition du processus en phases de conception

2.2.1 Données recueillies et traitements effectués

Dans un premier temps, le contexte des réunions et des expérimentations en classe a été analysé à partir des comptes rendus de réunion de conception et des ordres du jour afin d'identifier les objectifs des concepteurs, les techniques et les supports mobilisés. Ces derniers pouvaient correspondre à des maquettes, des prototypes, des croquis, des comptes rendus d'expérimentations, un plan de classe et le démonstrateur technologique.

Les traitements ont ensuite porté sur les traces de la conception, pour identifier l'évolution des trois composantes décrites précédemment. Les comptes rendus de réunions et des expérimentations en classe ainsi que les différentes versions des spécifications de l'application tangible ou des scénarios pédagogiques ont pour cela été analysés. Cette approche par les traces productives de la conception vise à justifier objectivement le choix des données traitées parmi l'ensemble des données recueillies tout au long de la conception.

2.2.2 Découpage préliminaire de l'activité de conception en 9 phases

L'analyse du contexte et du déroulement de chaque réunion de conception a permis d'identifier neuf phases principales pouvant être vues comme des classes de situation en conception (Rabardel, 2005) :

- construire un référentiel commun entre enseignants et ergonomes ;
- recueillir des attentes initiales en lien avec la technologie ;
- reformuler les scénarios existants et formuler des exigences ;
- affiner les choix de conception initiaux pour les reformuler en spécifications techniques ;
- confronter les participants au prototype afin d'étoffer les spécifications ;
- préparer les expérimentations en classe ;

- simuler l'activité future de l'enseignant en classe ;
- mettre en œuvre des solutions en situation réelle ;
- faire le bilan sur les expérimentations en classe.

La figure 32 décrit ces phases du travail par rapport au déroulement temporel de l'ensemble de la démarche de conception. Elle montre notamment que plusieurs phases pouvaient apparaître dans une même réunion et qu'elles ne s'enchaînaient pas linéairement.

Réunion de conception n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10	Expé 1	12	13	Expé 2	14
Prototypes fonctionnels																
Construire un référentiel commun entre enseignants et ergonomes	x	x														
Recueillir des attentes initiales en lien avec la technologie	x	x														
Reformuler les scénarios existants et formuler des exigences			x	x		x	x									
Affiner les exigences pour les reformuler en spécifications techniques					x	x										
Confronter les participants au prototype afin d'étoffer les spécifications							x	x	x	x	x					
Préparer les expérimentations en classe								x	x	x	x		x	x		
Simuler l'activité future des enseignants en classe									x	x	x					
Mettre en œuvre des solutions en situation réelle												x			x	
Faire le bilan sur les expérimentations en classe													x			x

Figure 32. Décomposition des réunions de conception en phases

Le tableau 9 présente une synthèse des différentes phases avec : leur objectif général ; les supports mobilisés, le matériel ou les objets intermédiaires ; les techniques particulières qui étaient utilisées ; les résultats productifs de chaque phase. Ces résultats préliminaires montrent l'intérêt de cette décomposition pour mettre en lumière des caractéristiques méthodologiques dans chaque phase.

L'analyse des échanges entre concepteurs dans chaque phase permettra d'affiner ces résultats préliminaires. Ces-derniers ne donnent en effet qu'une vision globale des caractéristiques méthodologiques de conception, mais ils informent peu sur les processus d'innovation ou d'intégration en jeu.

N°	Objectifs de chaque phase	Supports	Techniques spécifiques	Résultats
0	Construire un référentiel commun entre enseignants et ergonomes	Démonstrateur tangible Supports ppt	Présentations des tables interactives Entretien (avec un enseignant)	Aperçus mutuels de l'activité des autres
1	Recueillir des attentes initiales en lien avec la technologie et faire émerger des exigences	Démonstrateur tangible Aperçus mutuels de l'activité des autres		Attentes et exigences initiales
2	Reformuler les scénarios existants et élaborer la solution technique	Démonstrateur tangible Maquettes papier Croquis Scénarios initiaux Exigences prescriptives	Analogie avec les méthodes de conception à partir de scénarios	Scénarios intermédiaires Story-boards
3	Affiner les choix de conception initiaux pour pouvoir les reformuler en spécifications techniques	Démonstrateur tangible Maquettes Story-boards Spécifications TUIML Supports ppt	Présentation du format des spécifications (TUIML) Questions ciblées des ergonomes Proposition d'alternatives	Spécifications initiales
4	Confronter les participants au prototype afin de le débuguer et d'étoffer les spécifications initiales	Prototype tangible Spécifications initiales Scénarios intermédiaires	Présentation par les ergonomes « Manipulation libre »	Spécifications intermédiaires (débuguée + étoffée)
5	Préparer les expérimentations en classe	Prototype tangible Scénarios intermédiaires Plan de classe	Simulation physique	Organisation spatiale, matériel requis
6	Simuler l'activité future de l'enseignant en classe	Prototype tangible Spécifications intermédiaires Scénarios intermédiaires	Simulation des scénarios intermédiaires avec le prototype tangible	Spécifications intermédiaires (débuguée + étoffées) Scénarios pré-expérimentations
7	Mettre en œuvre des solutions en situation réelle	Prototype tangible Scénarios pré-expérimentations Spécifications intermédiaires	Expérimentation en classe avec le prototype et les scénarios pédagogiques adaptés	Scénarios post-expérimentation Synthèse des expérimentations en classe Spécifications post-expérimentation
8	Confronter les résultats des expérimentations aux hypothèses de conception	Prototype tangible Spécifications intermédiaires Scénarios post-expérimentation Synthèse des expérimentations en classe	Présentation synthèse ergo Allo-confrontation collective	Spécifications finales Scénarios finaux

Tableau 9. Synthèse des différentes phases de la conception

2.3 Analyse des verbalisations des concepteurs

2.3.1 Description du codage

Les verbalisations analysées correspondent aux échanges entre concepteurs sur leurs hypothèses de conception par rapport aux trois composantes tracées. Les verbalisations analysées rassemblent uniquement celles qui ont participé à l'avancement productif de la conception. Afin d'assurer la cohérence dans l'analyse de l'avancement des composantes, les hypothèses de conception ayant été formulée puis rejetées dans une même réunion n'ont pas été prises en compte. **Ce choix méthodologique permet notamment de discuter des résultats des processus d'intégration et d'innovations « cristallisés » dans les solutions de conception finales**. Le codage des verbatim présentés dans ce chapitre est présenté en annexe 3.

Les choix de conception ont été codés selon leurs dimensions prescriptive, interactionnelle physique (cf. Tableau 10).

Dimension des choix de conception	**Définition**
Physique	Propriétés physiques et représentationnelles des objets tangibles et des images affichées sur l'écran de la table interactive
Interactionnelle	Actions possibles de l'enseignant ou des élèves pour manipuler les objets tangibles ou modifier l'état de l'application tangible de simulation
Prescriptive	Modifications des scénarios pédagogiques relatives à l'application tangible de simulation : le déroulement du cours, les consignes, le discours de l'enseignant ou les tâches des élèves, le matériel nécessaire et son articulation avec les tables interactive ou les objets tangibles, ainsi que l'organisation spatiale de la classe avec l'artefact

Tableau 10. Grille de codage des choix de conception

Les justifications ont été codées par rapport aux catégories du modèle des TPACK (Mishra & Koehler, 2005 ; cf. Tableau 11). Celles qui impliquent des connaissances relatives aux tables interactives, aux interactions tangibles et aux objets intermédiaires, tels que les prototypes ou les scénarios adaptés pour ces technologies, sont codées avec un « T* ». Cette distinction vise à éviter les ambiguïtés avec des connaissances relatives au matériel expérimental ou informatique existant.

Type de connaissances mobilisées	Définition
CK	[Content Knowledge] Connaissances liées au contenu disciplinaire à enseigner, c.-à-d. les concepts, les théories, les cadres explicatifs, etc.
PK	[Pedagogical Knowledge] Connaissances générales sur les processus et les pratiques d'enseignement et d'apprentissage, la gestion de la classe, le développement et l'implémentation de leçons, l'évaluation des élèves, etc.

TK/T*K	[Technologica lKnowledge] Connaissances sur les technologies habituelles (papier, crayon, tableau…) et les nouvelles technologies ainsi que les modalités qu'elles proposent pour représenter l'information
PCK	[Pedagogical Content Knowledge] Connaissances sur les représentations et la formulation des concepts, sur ce qui rend une notion plus ou moins difficile à apprendre, sur les techniques d'enseignement les plus appropriées pour chacune, sur les connaissances antérieures des élèves et les conceptions préexistantes, etc.
TCK/T*CK	[Technological Content Knowledge] Connaissances sur les relations entre le contenu et la technologie, en quoi le contenu d'une discipline est transformé par l'utilisation d'une technologie, comment elle le contraint et les nouveaux types de représentations qu'elle propose ou la flexibilité pour passer de l'une à l'autre
TPK/T*PK	[Technological Pedagogical Knowledge] Connaissances sur les différents outils technologiques existants pour réaliser une tâche donnée et sur le type de stratégie pédagogique à employer pour profiter au mieux d'une technologie donnée
TPACK/T*PCK	[Technological, Pedagogical and Content Knowledge] Connaissances sur les représentations et la formulation de concepts en utilisant la technologie, sur les techniques pédagogiques qui exploitent au mieux la technologie pour enseigner un contenu donné, sur ce qui rend un concept plus ou moins difficile à apprendre et comment la technologie peut aider et sur comment la technologie peut être utilisée pour construire sur les connaissances existantes des élèves et pour les développer ou les renforcer.

Tableau 11. Grille de codage des justifications des choix de conception

Les justifications et les effets attendus des choix de conception ont été analysés afin de les associer aux processus d'intégration et d'innovation en conception (cf. Tableau suivant).

Code du processus	Définition
Intégration Techno	Adaptation du système technique aux pratiques et aux besoins des enseignants
Intégration Pratique	Adaptation des pratiques des enseignants aux contraintes du système technique
Innovation Techno	Innovation technique par rapport au potentiel des tables interactives
Innovation Pratique	Innovation et apports dans les pratiques des enseignants par rapport à leur activité actuelle

Tableau 12. Grille de codage des processus de conception

2.3.2 Description des traitements effectués sur les hypothèses de conception

Le verbatim suivant illustre les traitements effectués pour identifier un choix de conception, ses justifications, en termes de connaissances, et ses effets attendus.

> Transformation d'exigence physique concernant la modélisation : **ajouter un niveau de représentation avec une décomposition rouge/vert/bleu en plus du niveau habituel présentant un rayon de lumière**
> [ENS 2] : [dans ce type de modélisation], on est vraiment dans le **modèle de l'optique géométrique** [avec une droite pour représenter un rayon lumineux]. […] Et dire qu'un rayon de lumière est coloré, je ne sais pas moi… pour moi c'est gênant ou alors **il faudrait qu'on ait la possibilité d'ouvrir à l'intérieur, qu'il y ait quelque chose qui permette de voir ce que c'est que ce rayon de lumière. Parce que pour l'instant on n'en a jamais parlé.** [...]
> [ERGO 2] : Tu peux **faire une flèche qui serait de la même largeur qui se finirait en pointe** si tu veux garder le…

[DIDACT] : **Puis du coup tu peux les coller les unes aux autres** [les flèches rouge, verte et bleue...]. **Ça ressemble à un spectre… discontinu**… Mais **c'est un autre modèle de la propagation**. [...]
[ENS 2] : **À mon avis ça parle mieux, c'est un modèle qui peut convenir à l'optique avec la lumière colorée**.

Dans cet exemple, les participants s'appuient sur trois formes de connaissances :

- des connaissances de type **CK** sur la décomposition de la lumière blanche en une multitude de lumières colorées ;
- des connaissances de type **CK** sur le modèle du rayon lumineux habituellement utilisé en optique géométrique ;
- des connaissances de type **PCK** sur les connaissances antérieures des élèves : le modèle de l'optique ondulatoire n'a jamais été abordé, seulement celui de l'optique géométrique.

À partir de ces connaissances, et des échanges avec un ergonome, la modélisation choisie jusque-là a été **modifiée** afin d'intégrer des composantes du modèle de l'optique ondulatoire. Ainsi, en plus d'une droite représentant le rayon lumineux, un autre niveau propose trois flèches (rouge, verte et bleue) à la place de la droite (cf. Figure 33). Il s'agit d'un choix de conception de dimension physique, car il fait référence aux images à afficher sur l'écran de la table interactive.

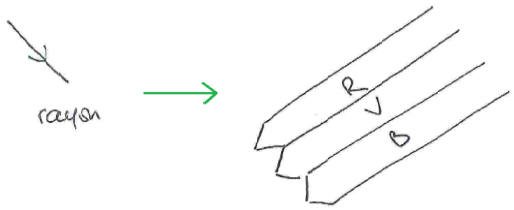


Figure 33. Exemple de modification de la modélisation de la lumière : du modèle du rayon lumineux vers une représentation selon les 3 couleurs primaires (rouge, vert, bleu)

Les effets attendus de ce choix de conception portent à la fois sur des questions de **rigueur de la modélisation** à proposer (évoqué dans les justifications) et **d'enrichissement des contenus existants** en modélisant les lumières colorées sous forme de flèches. L'hypothèse de conception correspondant à ce verbatim renvoie donc aux deux processus suivants :

- l'adaptation du système technique aux besoins et aux pratiques des enseignants
- l'innovation dans les pratiques d'enseignement.

Cet exemple montre qu'un effet attendu est parfois implicitement confondu avec une justification. Les résultats montreront que certaines hypothèses de conception ne véhiculent pas explicitement d'effets attendus, et que ces derniers doivent être inférés à partir des justifications. C'est pourquoi l'analyse des processus d'intégration et d'innovation s'appuie à la fois sur les effets attendus et les justifications.

3 Résultats

Cette partie synthétise dans un premier temps les résultats des traitements effectués phase par phase, puis toutes phases confondues, afin d'en discuter de façon plus globale.

3.1 Résultats détaillés pour chaque phase de la conception

Au début de chaque partie est décrit un résumé des principales caractéristiques méthodologiques et des processus relevés dans chaque phase.

3.1.1 Construire un référentiel commun entre participants et ergonomes

Dans cette phase, les participants étaient amenés à expliciter leurs besoins et à découvrir le potentiel technologique des tables interactives avec l'aide des ergonomes (cf. Tableau 13).

Méthodes	
Co-construction	
Participation	Rôle d'enseignants pionniers
Confrontation	
Cadrage	Présentation du potentiel technologique et des besoins actuels

Tableau 13. Bilan des caractéristiques méthodologiques de la phase de construction du référentiel commun

Les deux premières réunions ont permis de construire un référentiel commun initial entre les ergonomes, les enseignants et l'enseignante-chercheure en didactique autour de trois grands thèmes :

- L'activité actuelle des enseignants de physique-chimie (les techniques d'enseignement, l'utilisation des scénarios pédagogiques, les limites actuelles, etc.) ;
- L'approche du groupe de travail de l'IFÉ en termes d'objectifs didactiques ;

- La technologie et ses possibilités : interactions, fonctions, usages, intérêt a priori pour la formation, etc.

Les verbalisations sur l'activité actuelle des enseignants et l'approche didactique du GT ont permis de rendre compte de **besoins** explicites assimilés à des **connaissances** par rapport au modèle des TPACK, sans technologie émergente (cf. chapitre 6). Ce caractère conscient des besoins est, selon nous, imputable à l'expérience des participants dans l'enseignement ou en conception de ressources pédagogiques. Le verbatim suivant montre par exemple les limites rencontrées par les enseignants pour certaines tâches attribuées au matériel expérimental vieillissant :

> *[Verbatim 1] Exemple de besoin relatif aux contraintes matérielles*
> [DIDACT] : (…) faire une **bonne synthèse additive en classe avec le matériel qu'on a à disposition, c'est pas possible.** On a de vieux filtres, de vieux murs, de vieilles lampes, pas assez de lampes…

Les ergonomes ont ainsi pu se familiariser avec l'activité d'enseignement de référence des participants. Ils ont ensuite présenté les **technologies émergentes** (table interactive, objets tangibles et tablettes), leurs usages existants et leurs intérêts et limites actuelles d'après la littérature. Ils ont pour cela eu recours à des **supports** de présentation et à un **démonstrateur** sur la table interactive. Les enseignants ont alors pu interagir avec cette technologie qu'ils connaissaient peu et se représenter son potentiel technologique, comme dans le verbatim suivant :

> *[Verbatim 2] Exemple de présentation de la technologie par un ergonome concernant les interactions tangibles disponibles sur la table interactive*
> [ERGO 2] : [en illustrant avec démonstrateur] Ce qui est intéressant, c'est le fait qu'**on peut associer un objet virtuel avec un objet physique, mais aussi deux objets tangibles ensemble qui vont avoir des fonctions particulières.**
> [ENS 1] : Ça veut dire qu'en avoir deux c'est mieux que d'en avoir qu'un seul ?
> [ERGO 2] : Ce n'est pas forcément mieux, mais ça offre plus d'applications possibles grâce à la combinaison d'objets.

Si cette phase de construction d'un référentiel commun n'a pas donné lieu à la formulation d'hypothèses de conception, elle a néanmoins été essentielle pour participer au **cadrage** du champ des possibles. L'explicitation d'un certain nombre de **besoins** des enseignants et de la didacticienne, d'une part, et la **description du potentiel technologique** des tables interactives, d'autre part, a en effet pu participer aux **apprentissages mutuels** entre concepteurs. Ces apprentissages, initiés dans cette phase et poursuivis dans les suivantes, ont notamment pu avoir pour effet de rendre possible l'activité de conception à un niveau implicite entre eux, par exemple dans les verbatim 13 et 14 dans lesquels les effets attendus sont implicites (voir plus loin).

3.1.2 Recueillir des attentes initiales et faire émerger des exigences vis-à-vis des tables interactives

Dans cette phase, un objectif commun à l'ensemble des participants, ergonomes inclus, a été d'identifier en quoi la technologie émergente pourrait **améliorer les TP-cours actuels** et de générer des attentes en lien avec la technologie émergente. Les résultats mettent en avant l'effet de l'élaboration des caractéristiques technologiques par des enseignants pionniers sur **l'émergence d'usages innovants**, tant d'un point de vue **technologique** que du point de vue de leurs **pratiques de référence**. Les scénarios pédagogiques ont été peu mentionnés dans cette phase : les usages évoqués étaient généraux et les questions d'intégration dans le déroulement du cours ont peu été discutées (cf tableau 14).

Méthodes		Processus
Co-construction	Usages possibles des tables interactives	Innovation Techno
Participation	Rôle d'enseignants pionniers + de référence	Innovation Pratique
Confrontation		
Cadrage		

Tableau 14. Méthodes et des processus de conception dans la phase de recueil des attentes

Au regard des composantes tracées, trois attentes ont émergé renvoyant chacune à une fonction secondaire que devrait remplir l'application tangible de simulation :

- permettre à l'enseignant d'enrichir son cours en proposant de simuler des expériences avec de nouvelles « sources lumineuses » (cf. verbatim 4) ;
- permettre de travailler sur la simulation de phénomènes physiques à différents niveaux de représentation, jusqu'à leur modélisation physique ;
- permettre à des utilisateurs d'interagir avec la simulation devant le reste de la classe pour illustrer des explications ou alimenter le débat en classe (cf. verbatim 3) ;

Les attentes relevées vis-à-vis des tables interactives montrent que la technologie émergente était principalement vue par les enseignants comme une **ressource pour améliorer leur activité** en exploitant le potentiel des tables interactives. La figure suivante montre en effet que les processus d'innovation technologique et dans les pratiques enseignantes sont liés à ces attentes.

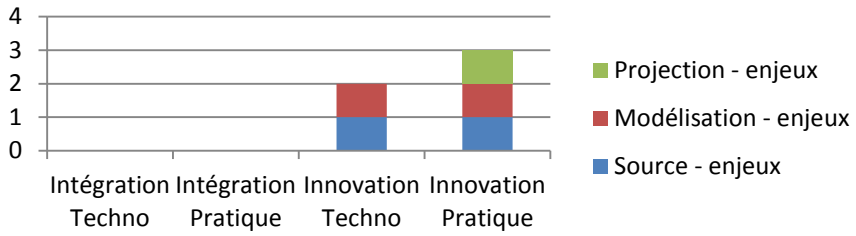


Figure 34. Processus engagés dans la phase de recueil des attentes initiales et des premières exigences

Ce résultat s'explique par le fait que les participants ont dans un premier temps adopté une démarche créative, en se souciant peu des questions d'intégration, assimilables à des contraintes. Les participants s'appuyaient davantage sur leurs besoins pour anticiper des **usages potentiellement bénéfiques** par rapport à leur activité actuelle en se projetant dans une situation d'enseignement potentielle, avec des tables interactives. Cette interprétation est soutenue par le fait que la majorité des connaissances mobilisées pour justifier les attentes sont de type CK ou PCK et renvoient à des besoins des participants (cf. Figure 36).

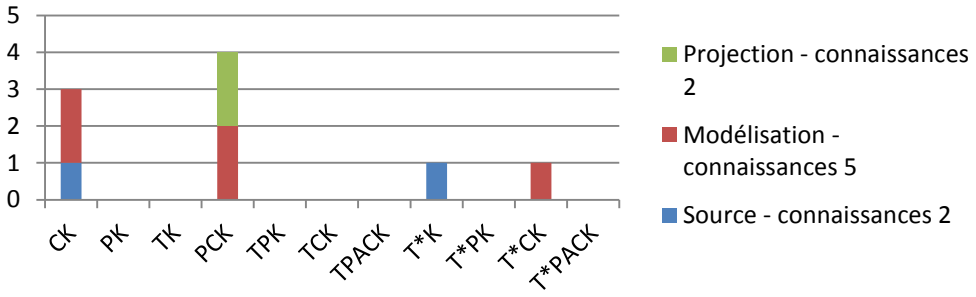


Figure 35. Connaissances mobilisées dans la phase de recueil des attentes

Leur d'enseignants « pionniers » est ici mis en avant. Par exemple dans le verbatim 3, les usages proposés visent à **dépasser des difficultés rencontrées** par les élèves pour expliciter leur raisonnement grâce à la simulation projetée devant la classe.

> *[Verbatim 3] Génération d'une attente vis-à-vis de la technologie :* ***permettre la projection au tableau de l'interface de la table interactive***
> [ENS 1] : Le passage sur la table [peut être] une **étape dans l'activité** ou [...] un moment de **bilan** dans lequel **on fait la synthèse des conclusions**, on échange et quelques **élèves peuvent montrer ce qu'ils pensent** à la classe **en projetant** pour avoir des **échanges**
> [DIDACT] : Mine de rien je me disais que **pour expliquer ce qu'ils ont fait** ça peut être bien parce **qu'ils ont du mal à expliquer** ce qu'ils font, de raconter l'histoire de qu'est-ce qui leur a permis de

comprendre… La simulation pourrait aider. […] Ça va **permettre de structurer son protocole** en refaisant rapidement et en ajustant l'expérience.

Les attentes étaient généralement illustrées par des exemples plus concrets, proches d'exigences sur les propriétés techniques nécessaires pour réaliser ces fonctions, comme des objets tangibles génériques. Néanmoins, il s'agissait principalement de propositions créatives, peu développées, qui n'ont pas été considérées comme des exigences à ce stade de la conception. Elles étaient cependant encouragées par les ergonomes, qui les reliaient aux **caractéristiques de la technologie émergente** afin d'en **exploiter le potentiel**. Le verbatim 4 illustre cet effort d'assimilation concernant l'intérêt des objets tangibles génériques.

> *[Verbatim 4]* ***Génération d'une attente vis-à-vis de la technologie : permettre à l'enseignant d'enrichir son cours en proposant de nouvelles « sources lumineuses » tangibles génériques***
> [ENS 1] : Là où ça serait intéressant la simulation, ça serait de multiplier les exemples, c'est-à-dire **multiplier les sources**. (...) **Ça ferait une banque de situations**, ce qui n'est pas fondamental à dire vrai, mais ça offre cette possibilité et c'est intéressant. (...) On pourrait se déplacer sur la table et essayer d'autres sources de lumière en utilisant l'objet spectroscope pour se déplacer sur les **différentes sources de lumières**. Par exemple la bougie, donc la flamme, une lampe, de type économie d'énergie… (...)
> [ERGO 2] : Après on peut avoir des **objets génériques** : des objets qui vont changer de fonction d'un TP-cours à un autre. (...)
> [ENS 1] : Ça devient **intéressant pour l'enseignant** alors ça, d'avoir un **objet « outil » multifonctions**, un **couteau suisse pour toutes les situations**, avec des **images différentes selon les situations**.

Ce type d'intervention explique qu'une partie des processus de conception relevés renvoient à **l'innovation technologique**. Cependant, le fait que le potentiel interactif et technique des tables interactives ait été présenté, à l'aide d'un démonstrateur, dans la phase de construction du référentiel commun articulée avec celle-ci, a également pu favoriser ce processus.

3.1.3 Reformuler les scénarios existants et formuler des exigences

Cette phase a vu les concepteurs élaborer à la fois l'application tangible de simulation et les scénarios pédagogiques. Les participants se sont principalement appuyés sur les scénarios pédagogiques existants et sur leurs objectifs didactiques pour justifier leurs choix de conception. Ces derniers visaient à la fois **l'amélioration de leurs pratiques futures** et **l'adaptation de l'application tangible à leurs besoins**. Des **processus d'innovation technologique** ont également été relevés dans cette phase, mais ils étaient principalement portés par les ergonomes. Le tableau suivant résume les caractéristiques méthodologiques et les processus de conception de cette phase.

Méthodes		Processus
Co-construction	Caractéristiques techniques et scénarios pédagogiques	Intégration Techno
Participation	Rôle d'enseignants pionniers + de référence	Innovation Pratique
Confrontation	Démonstrateur et maquettes papier	Innovation Techno
Cadrage	Scénarios pédagogiques existants	

Tableau 15. Méthodes et des processus de conception dans la phase de reformulation des scénarios existants et de formulation d'exigences sur l'application tangible

À partir des attentes relevées vis-à-vis des tables interactives, cette phase avait pour but de reprendre les scénarios existants et de les reformuler, en élaborant en parallèle des exigences pour l'application de simulation tangible. Elle présente ainsi des similitudes avec les techniques de conception basées sur des scénarios (Carrol, 2000 ; Rosson & Carrol, 2002). Cependant, dans notre cas, les scénarios pédagogiques n'étaient pas figés : leur adaptation allait de pair avec la conception de l'artefact pour transformer l'activité des enseignants concepteurs. En effet, entre les réunions de cette phase, des scénarios intermédiaires ont été rédigés par les membres du GT ainsi que des story-boards par les ergonomes. Ils servaient de support de conception du couple artefact-scénarios, au même titre que le démonstrateur tangible et des maquettes papiers. Ces caractéristiques méthodologiques ont selon nous participé à la génération puis à l'évolution d'exigences concernant les dimensions prescriptives, physiques et, dans une moindre mesure, interactionnelles, synthétisées dans la figure 36.

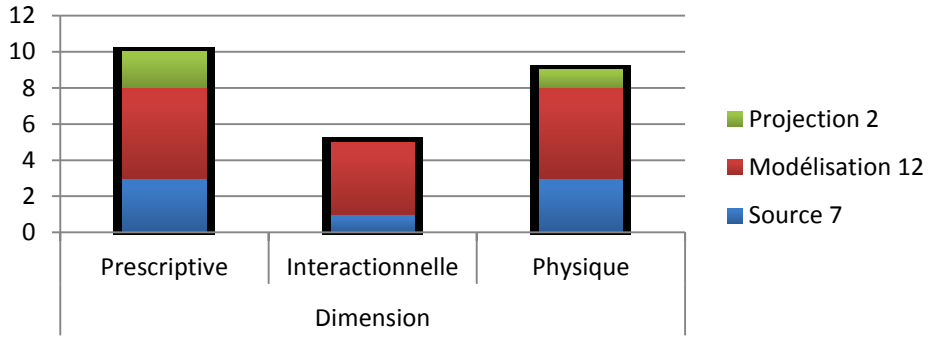


Figure 36. Dimensions des choix de conception dans la phase de reformulation des scénarios pédagogiques et de formulation des exigences initiales sur l'application tangible

Les exigences physiques portaient en majorité sur la représentation de deux niveaux de modélisation : l'un en lien avec le modèle du rayon lumineux et l'autre, **nouveau**, créé spécifiquement pour l'application tangible de simulation, dans un **processus d'innovation**. Ce niveau permet d'afficher des spectres entre les schémas des éléments du modèle, comme l'illustre le verbatim 5.

> *[Verbatim 5]* ***Transformation d'exigence physique*** *concernant la modélisation :* ***la représentation du modèle RGB doit être remplacée par une représentation avec un spectre contenu dans une fenêtre sur la flèche représentant le trajet de la lumière***
> [ENS 2] : Est-ce que ça serait intéressant d'**avoir une flèche plus épaisse**, et que cette flèche apparaisse blanche ? **Avec dedans un joli spectre** de la lumière blanche, un arc-en-ciel, et puis ici (après réflexion sur l'objet rouge) une lumière qui n'ait **que les rayons rouges.**
> [DIDACT] : Moi je verrais bien deux choses : [le niveau] « **Lumière blanche** » et puis ça (la flèche), du coup ça ferait un autre niveau. Ça **montrerait de quoi est composée la lumière blanche** ; la lumière blanche c'est ça (spectre de toutes les couleurs). Je trouve que c'est **bien pour montrer les couleurs** proches du rouge. [...] Et là du coup c'est le **niveau intermédiaire dont on a besoin avant le modèle.** [...]
> [ENS 2] : Parce que ça me plaît énormément, **les élèves ils voient bien le truc**, **enfin j'ai l'impression.**
> [DIDACT] : Du coup ça peut être le **niveau qui permettrait de passer à ça ensuite** (au vrai modèle théorique) ?

Des exigences prescriptives visaient à **améliorer les scénarios existants** relativement à l'élaboration de l'application tangible de simulation. Ces scénarios étaient alors mobilisés en tant que support pour guider la conception, ce qui a conduit à traiter chaque TP-cours de la séquence l'un après l'autre pour réfléchir à des améliorations possibles. Celles-ci ont porté sur le discours de l'enseignant, sur la gestion du cours et sur le déroulement des TP-cours avec les nouveaux contenus disciplinaires disponibles. Le verbatim 6 illustre ce dernier cas, par exemple en abordant des notions plus tôt dans la séquence pour que les élèves se l'approprient davantage.

> *[Verbatim 6]* ***Transformation d'exigence prescriptive : l'introduction du modèle doit se faire dans le TP-cours n° 2 et plus dans le n ° 3***
> [DIDACT] : **Ça c'est le spectre**. Et puis il s'étend et puis quand il passe derrière l'objet transparent…
> [ENS 2] : En réalité **on est en train de parler de l'activité 3** parce que **cette activité 3** en fait **introduit un modèle** et c'est vrai que ce modèle, c'est **ce qui nous posait problème** jusqu'à présent.
> [DIDACT] : Et que finalement, là **le modèle il est plus introduit à l'activité 3, mais à l'activité 2** avec le spectroscope et du coup il est réutilisé à l'activité 3, **ce qui est mieux.**

Inversement, des exigences physiques ont été générées à partir des scénarios existants, en vue **d'adapter l'application tangible aux pratiques existantes**. Le verbatim 7 montre par exemple comment l'étape « pour aller plus loin » des scénarios pédagogiques existants a conduit à l'ajout d'une source « néon » dans la simulation sur table interactive.

> *[Verbatim 7]* ***Génération d'une exigence physique : ajouter une source « néon » dans la simulation suite à une modification du scénario du TP-cours 2, dans la partie « pour aller plus loin »***
> [ENS 1] : Moi **dans le « pour aller plus loin »,** je les ferais **observer une source de lumière artificielle** pour **qu'ils comprennent qu'il y a des différences**, mais que l'œil ne les voit pas. [...]
> [DIDACT] : Alors « pour aller plus loin » **on peut mettre d'autres objets** [sources lumineuses].

[ENS 2] : Du coup dans l'histoire, il faudrait **rajouter un tube néon** qui serait une source qui enverrait de la **lumière sous forme de raies spectrales.**

Ainsi, le fait de s'être appuyé sur les scénarios existants a mis l'accent sur les besoins actuels des participants en termes d'invariants, p. ex. la structure de la démarche d'investigation ou les contenus à enseigner. Le fait que la majorité des justifications renvoient à des connaissances de type PCK et, dans une moindre mesure, CK appuie ce constat (cf. Figure 37).

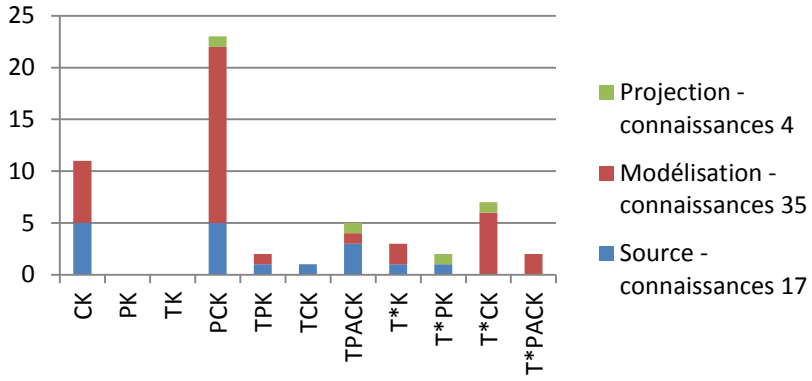


Figure 37. Connaissances mobilisées dans la phase de reformulation des scénarios pédagogiques et formulation d'exigences techniques

Comme le verbatim 7, un grand nombre d'exigences physiques visait à tenir compte de ces besoins pour favoriser **l'innovation dans les pratiques enseignantes**, en raisonnant par analogie. En effet**,** les enseignants faisaient déjà observer le néon aux élèves, sans table interactive, mais avec des résultats mitigés en termes d'apprentissage. Les participants ont donc proposé d'ajouter d'un néon dans les sources tangibles, pour cette étape, en faisant l'hypothèse que la simulation cela **améliorerait l'apprentissage**.

Les verbatim 6 et 7 ont ainsi montré que des exigences de dimensions différentes ont parfois évolué en parallèle, ce qui montre que si la prescription pouvait être une ressource pour la conception d'un artefact, la technologie jouait un rôle similaire pour la transformation de la pratique de l'enseignant. Dans les phases suivantes cependant, l'articulation entre les différentes dimensions était moins marquée. Cette dynamique met en avant l'intérêt de la méthode de co-conception du système technique et des pratiques enseignantes pour les **processus d'intégration et d'innovation** relevés dans cette phase.

Par ailleurs, les exigences interactionnelles abordaient les manipulations possibles d'un utilisateur en **exploitant le potentiel technologique** des tables interactives, décrit par les ergonomes, par exemple pour passer d'un type de modélisation à un autre (verbatim 8) :

> *[Verbatim 8]* ***Génération de spécification interactionnelle** et **physique** : **le modèle doit s'afficher en découpant l'écran par interactions tactiles et en changeant l'échelle de la simulation pour qu'elle apparaisse en parallèle du modèle***
> [ERGO 2] : On peut faire quelque chose qui rétrécit l'échelle de l'image, et vu qu'il ne reste que les trucs virtuels, **on peut réduire la fenêtre dans l'écran**…
> [ENS 2] : Ce que tu viens de dire (s'adresse à [ERGO 2]), ça vient de me donner une idée, on pourrait faire comme ça, là-dessus il y aurait le fameux dessin et puis **on met son doigt ici et son doigt ici** (dans les deux coins gauches) et hop **ça réduit la taille de ça** (les images des objets tangibles). Et **ça ouvre une deuxième fenêtre**, avec la taille des images d'objets réduisant, **ça fait grossir une sorte de modèle** ici (dans la nouvelle fenêtre). [...]
> [ERGO 2] : Oui justement c'était pour ne pas les perdre (les élèves) puisque tu disais qu'ils auraient peut-être du mal à comprendre…
> [ENS 2] : Oui je trouve ça très bien en fait.
> [DIDACT] : Ouais c'est ça, on pourrait les mettre n'importe où après (les objets tangibles avant de les enlever pour laisser les images). On met un doigt de chaque côté ici et hop ça réduit la taille de ça, et ça ouvre **un modèle qui soit dans la même orientation**. Je pense que ça serait pas mal comme ça.

Dans cet exemple, l'activité des élèves (renvoyant à des connaissances de type PCK) a été évoquée, concernant notamment leur compréhension des phénomènes physiques étudiés ou des niveaux de représentations proposées dans l'application tangible. Les exigences de ce type faisaient principalement référence à un **processus d'adaptation de l'application** pour favoriser la compréhension des nouveaux contenus affichés dans la simulation. Par ailleurs, des **processus d'innovation technologique** ont également été relevés. Ils étaient cependant principalement portés par les ergonomes lorsqu'ils proposaient d'exploiter le potentiel technique des tables interactives ou proposaient des solutions (verbatim 8) en les illustrant avec le démonstrateur ou des maquettes papier.

En résumé, la figure suivante résume nos propos relatifs aux principaux processus en jeu dans cette phase, à savoir **l'innovation dans les pratiques enseignantes** et **l'intégration de l'application tangible dans celles-ci** et, dans une moindre mesure, l'innovation technologique en exploitant le potentiel des tables interactives.

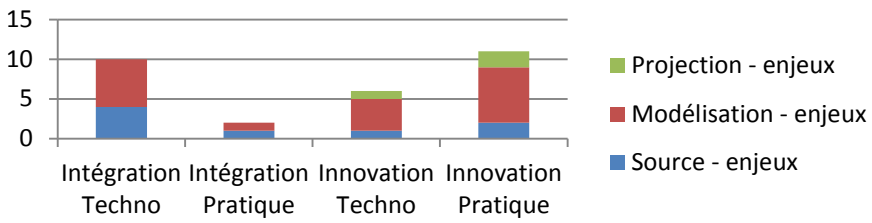


Figure 38. Processus engagés dans la phase de reformulation des scénarios pédagogiques et de formulation d'exigences techniques

3.1.4 Affiner les choix de conception initiaux pour les reformuler en spécifications

Dans cette phase, seule l'application tangible a fait l'objet de choix de conception, élaborés à un niveau de détail suffisant pour rédiger des spécifications techniques. Les participants, enseignants et didacticienne, ont alors été des co-concepteurs visant à favoriser **l'adaptation du futur prototype à leurs besoins et aux scénarios reformulés** dans la phase précédente. Ils se sont **approprié la technologie émergente** pour être en mesure de formuler des spécifications sur l'interface de l'application tangible. Les ergonomes ont pour cela eu recours à différents objets intermédiaires pour que les participants enrichissent leurs représentations de l'artefact et de ses usages à l'aide de maquettes et de story-boards. De plus, ils ont proposé des solutions **exploitant le potentiel de la technologie**, sur lesquelles les participants ont pu rebondir afin de poursuivre l'élaboration de l'artefact en vue d'améliorer leurs pratiques (cf. Tableau 16).

Méthodes		Processus
Co-construction	Caractéristiques techniques uniquement	Intégration Techno
Participation	Rôle d'enseignants co-concepteurs	Innovation Pratique
Confrontation	Story-boards, démonstrateur et maquettes	
Cadrage		

Tableau 16. Méthodes et des processus de conception dans la phase d'affinage des exigences en spécifications

À partir exigences relevées concernant l'artefact technique et des scénarios intermédiaires avec leurs croquis, les ergonomes ont rédigé une ébauche des spécifications techniques de l'application de simulation tangible. Les choix de conceptions relevés dans cette phase

visaient principalement à combler certains manques ou incohérences dans les exigences de la phase précédente. Ils apparaissent moins nombreux dans cette phase et renvoient majoritairement à des transformations des spécifications physiques de la source lumineuse et de la modélisation (cf. Figure 39).

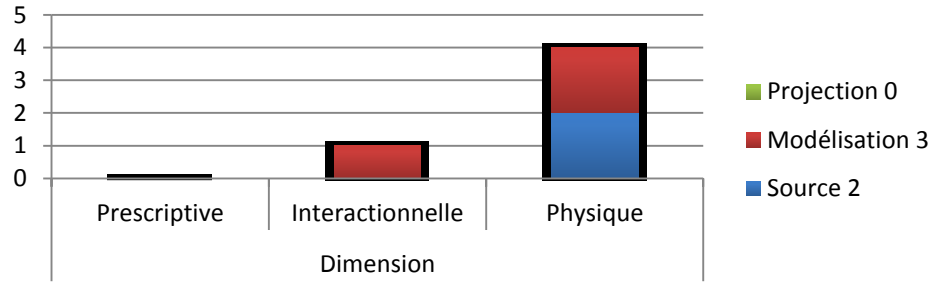


Figure 39. Dimensions des choix de conception dans la phase d'affinage des choix de conception initiaux pour les reformuler en spécifications techniques

À partir de supports PowerPoint et de l'ébauche de spécification rédigée, les ergonomes ont exposé aux participants les points à préciser pour pouvoir étoffer ces spécifications techniques, les plaçant ainsi en position de co-concepteurs. Ils ont également proposé des **solutions exploitant le potentiel et les usages possibles de la technologie**, sur lesquels les participants ont pu rebondir afin de les discuter en termes **d'intégration dans les pratiques enseignantes** ou **d'amélioration de ces pratiques (cf. Figure 40)**.

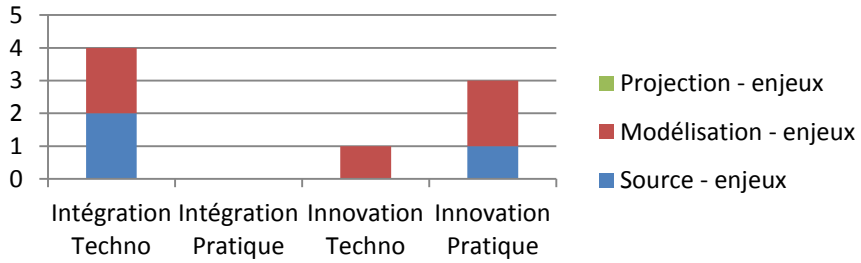


Figure 40. Processus engagés dans la phase d'affinage des choix de conception

Le verbatim 9 rend compte de **processus d'intégration** et **d'innovation** dans lequel les ergonomes ont exploité le potentiel des tables interactives, en termes d'affichage d'information, pour proposer une représentation de la modélisation plus adaptée aux besoins des participants que ce qui avait été discuté auparavant (cf. verbatim 10).

[Verbatim 9] ***Transformation de spécification physique : la représentation du modèle doit être affichée en parallèle de la simulation tangible, sur un fond blanc***
[ERGO 2] : Alors ça, c'est une autre question, celle du changement de représentation quand on passe… En fait **on est partis sur 2 fenêtres** et on avait pensé à d'autres alternatives en fait. L'avantage des deux fenêtres, c'est que ça **permet de faire une séparation claire entre modèle et expérience**. Ça, c'est quelque chose qui semble important. [...]
[DIDACT] : Ouais on s'était dit qu'**il fallait faire attention**, alors peut-être alors je ne sais pas, si au niveau des **affichages de fond de couleur**…
[ERGO 2] : Exactement, c'est aussi à ça que j'ai pensé, de faire peut-être **un fond blanc** pour le modèle comme ça on aurait le **modèle en noir**, enfin juste en trait tout ça, et **en parallèle**.
[DIDACT] : Du coup **ça permet d'avoir le trait noir** (du modèle du rayon lumineux) […]

Le verbatim 10 rend compte quant à lui d'un **processus d'innovation des pratiques** suite à des questions soulevées par les ergonomes concernant la transition entre la simulation et le modèle.

[Verbatim 10] ***Transformation de spécification interactionnelle : la transition du modèle du rayon de lumière au modèle intermédiaire avec le spectre doit se faire en posant le spectroscope dans la simulation***
[DIDACT] : On a une idée là ! Vas-y [ENS 2]
[ENS 2] : Le spectroscope justifie en fait **le fait de devoir écarter le**… tu sais faire le [geste en écartant les doigts comme pour zoomer = spread]. Du coup au lieu de [spread] **on met le spectroscope**. Tout simplement.
[DIDACT] : Entre ce passage-là et là, **on avait dit qu'on mettait les doigts sur la flèche et qu'on écartait.** Donc on « pinchait incspread]. Et la nouvelle **idée c'était** d'associer la flèche, enfin quand tu fais **l'association terme à terme** comme si on avait une analogie. **Mais** ce n'est pas une analogie, **c'est une modélisation**. Donc l'œil-l'œil, le soleil-la source de lumière, et puis tu as la flèche-le spectroscope. Donc je pense qu'en fait il faut qu'on enlève le spectroscope parce qu'il n'a rien à faire en fait dans la représentation de la visualisation de la lumière**. La visualisation de la lumière en termes de rayon en fait c'est sans le spectroscope. Quand on place le spectroscope** en fait, on a **la flèche** qui **se dilate**.
[ERGO 2] : C'est pour faire la transition en fait ?
[DIDACT] : Voilà et **du coup on a 3 niveaux**, mais qui apparaissent comme étant 3 niveaux et non pas comme des superpositions de modèles, parce que c'est ce qui était un petit peu **gênant d'avoir ces deux modèles qui vivaient en parallèle**, c'est qu'il y a un niveau qui nécessite un instrument.

Ce verbatim montre en particulier les participants discuter des interactions possibles pour passer d'un niveau de représentation à un autre, en articulant interactions tangibles et tactiles, ce qui peut rendre compte d'une forme **d'apprentissage**. Ils avaient en effet peu de connaissances sur les tables interactives en amont de la conception donc ils ont dû se familiariser avec cet artefact pour participer à sa spécification et anticiper sa potentielle articulation avec leurs pratiques enseignantes. Cette interprétation est soutenue par l'analyse des connaissances mobilisées dans les justifications des choix de conception dans cette phase. La majorité des était en effet de type T*CK (cf. Figure 41), relatifs aux modalités de représentation des informations dans l'application tangible. Celles-ci portaient soit sur les possibilités offertes par les tables interactives, soit sur l'état antérieur de la solution. En cela, l'utilisation de story-board et de maquettes a pu favoriser ces **apprentissages**, en tant qu'objets intermédiaires « basse fidélité », en participant à la construction de ces deux types de connaissances.

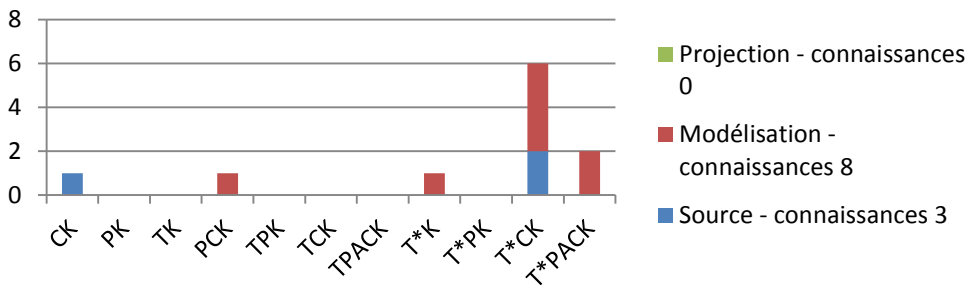


Figure 41. Connaissances mobilisées dans la phase d'affinage des choix de conception

Il est également à noter que plusieurs propositions émises par les ergonomes aux niveaux interactionnels et physiques ont été rejetées par les participants. Dans certains cas, elles allaient à l'encontre de pratiques enseignantes, par exemple dans le déroulement du cours, et dans d'autres elles auraient pu poser des difficultés aux élèves de par la complexité des représentations proposées. Ces rejets renvoient donc à des **processus d'intégration de l'application tangible** dans les pratiques enseignantes.

3.1.5 Confronter les participants au prototype afin d'étoffer les spécifications

Dans cette phase, les effets attendus des choix de conception portent en majorité sur la compréhension par les élèves des modalités de représentation de l'information choisies, c.-à-d. les métaphores, et sur leur cohérence par rapport à la physique. Elle ne porte pas directement sur l'amélioration des activités d'enseignement et d'apprentissage comme dans les deux premières phases. Les effets attendus portent davantage sur des objectifs secondaires, mais nécessaires pour **l'intégration de l'application tangible**. La présentation de différentes versions du prototype a permis aux co-concepteurs de confronter leurs hypothèses de conception, d'une part, mais surtout d'ajuster les représentations des éléments physiques de l'interface. Concrètement, pour que les élèves puissent réaliser les nouvelles tâches proposées par les enseignants, ils doivent d'abord pouvoir utiliser l'application tangible et comprendre les informations proposées par son interface (images et objets). Le tableau suivant résume ce bilan concernant les méthodes et les processus de conception.

Méthodes		Processus
Co-construction	Caractéristiques techniques uniquement	Intégration Techno
Participation	Rôle d'enseignants co-concepteurs	
Confrontation	Prototype	
Cadrage		

Tableau 17. Méthodes et des processus de conception dans la phase de confrontation des participants au prototype

Cette phase de confrontation au prototype fonctionnel était distribuée sur plusieurs réunions (cf. Tableau 33) avec, pour chacune d'elles, une version différente du prototype que les enseignants co-concepteurs étaient libres de manipuler. Le prototype était à chaque fois présenté aux enseignants, puis il y avait débat autour des spécifications validées, manquantes ou à modifier.

De nombreuses transformations de spécifications physiques ont été nécessaires avant d'arriver à un résultat satisfaisant en termes d'images à afficher ou de formes d'objets tangibles. C'est pourquoi, après la phase de reformulation des scénarios existants, cette phase a été la plus fructueuse en termes de choix de conception. Ces derniers correspondaient principalement à des transformations de spécifications physiques sur la modélisation et les sources lumineuses, comme le montre la figure 42, **afin de les adapter aux pratiques enseignantes**, existantes ou futures.

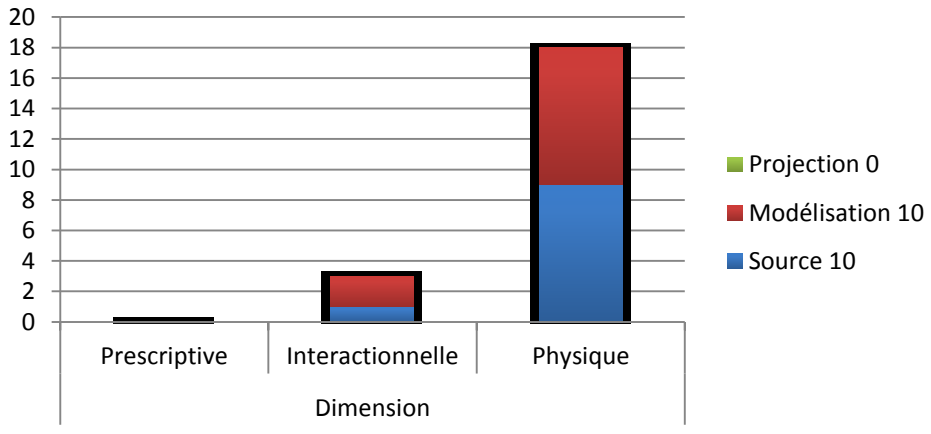


Figure 42. Dimensions des choix de conception dans la phase de confrontation des participants au prototype afin d'étoffer les spécifications

Le caractère novateur des formes de représentation de l'information proposées par les tables interactives peut expliquer ce résultat, étant donné l'importance des formes de représentations telles que les métaphores, à la fois en physique et dans la littérature sur les interfaces tangibles en général (p. ex. Fishkin, 2004 ; Koleva & al. 2003). C'est pourquoi les caractéristiques des éléments de l'interface étaient discutées en détail par les enseignants co-concepteurs pour qu'il n'y ait pas d'ambiguïté dans les spécifications. Les différentes versions du prototype et des objets tangibles permettaient ensuite de confronter des hypothèses de conception, en simulant les interactions avec l'interface tangible. Les verbatim 11 et 12 mettent en avant les itérations réalisées dans cette phase, concernant des propositions d'objets tangibles pour représenter les sources lumineuses (cf. Figure 29).

> *[Verbatim 11]* ***Génération de spécification physique : la forme de l'objet source doit représenter une boule sur un socle***
> [ERGO 2] : Et pour la forme de la source ? Parce que ça, c'était un objet proposé par un designer…
> [DIDACT] : En fait j'aurais bien vu plus **une forme de soleil, une boule sur un socle,** qui donne **l'idée que la propagation se fait dans toutes les directions.**
> [ERGO 2] : Et au niveau de la métaphore quand on mettra d'autres sources plus tard, est-ce que ça va être cohérent ?
> [ENS 2] : Oui je pense, c'est **une forme générique**.
> [DIDACT] : Ça peut **faire penser à une ampoule, à un soleil**...
> [ENS 2] : Les élèves **il faut qu'ils sachent que c'est une source**. Alors s'ils ont un objet qui ressemble un peu à un soleil**, ça peut** éventuellement **les orienter vers l'idée que c'est une source.**
> [ERGO 2] : Pour la source générique, il faut faire un compromis entre la forme de l'objet et les dessins spécifiques.
> [ENS 2] : Si tu mets **une sphère**, ça peut être pas mal du coup.
> [DIDACT] : Oui les **objets tangibles** doivent servir d**'intermédiaire entre le réel et le** modèle, donc leur représentation doit être entre les deux. Pour **la lumière**, c'est souvent **quelque chose qui « diffuse »**.

> *[Verbatim 12]* ***Transformation de spécification physique : l'objet source générique doit être modifié en agrandissant la sphère et en diminuer le socle***
> [ERGO 1] : **Il y a un problème** de rapport entre le pied… enfin le pied il est aussi grand que… (la boule), donc du coup ça fait plus poignée de porte.
> [DIDACT] : C'est pour ça que moi **je voyais plus la boule de cristal** tu vois.
> [ERGO 2] : Donc on fait le **pied plus petit** ?
> [DIDACT] : Ouais
> [ERGO 1] : Et la **boule plus grosse** quoi.
> [DIDACT] : Donc il faudrait un **plus petit socle**

Par ailleurs, les objets intermédiaires « haute-fidélité », c.-à-d. les versions du prototype avec les objets tangibles, ont permis d'identifier des erreurs de conception. Ce résultat est par exemple illustré par verbatim 13 sur une erreur dans l'affichage du sens de propagation de la lumière.

> *[Verbatim 13]* ***Transformation de spécification physique*** *concernant la modélisation proposée dans une version du prototype :* ***le sens de la flèche contenant le spectre dans la modélisation doit être inversé***

[ENS 2] : Si je peux me permettre, **la flèche avec le spectre** [dans le prototype d'application tangible], elle **devrait être dans l'autre sens**, car **ça correspond à la flèche du rayon lumineux** qui est en dessous.
[DIDACT] : Oui parce que tu as quand même un **sens d'illumination.**
[ENS 1] : Oui moi je suis d'accord, c'est ce que j'allais dire.
[ENS 2] : Sinon on a **l'impression que la lumière elle part de l'œil.**

Les trois derniers verbatim précédents ainsi que la figure 43 montrent que, comme pour la phase précédente sans prototype, celle-ci a vu les participants mobiliser en majorité des connaissances de type T*CK.

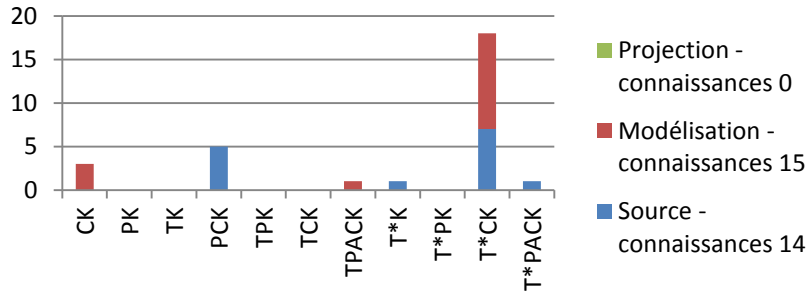


Figure 43. Connaissances mobilisées dans la phase de confrontation des participants au prototype

Cependant, ces connaissances étaient parfois associées à d'autres, indépendantes de la technologie, afin de favoriser l'intégration de l'application tangible en garantissant la rigueur et l'exactitude des informations affichées. Dans le verbatim 13 par exemple, les lois sur le sens de propagation de la lumière sont invoquées pour justifier la modification du modèle affiché. Cet exemple n'est pas anodin, car ces **processus d'intégration** sont prépondérants dans cette phase (cf. Figure 44), plus que dans n'importe quelle autre phase.

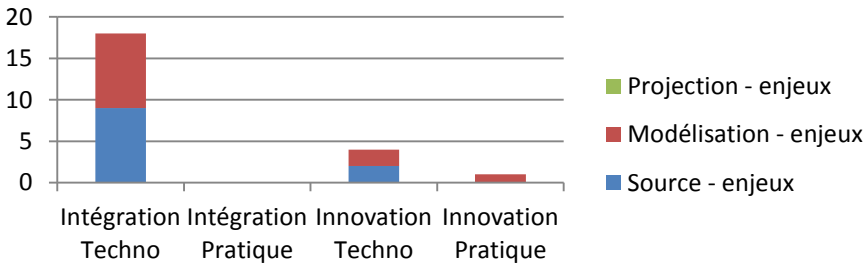


Figure 44. Processus engagés de la phase de confrontation des participants au prototype

3.1.6 Préparer les expérimentations en classe

De même que pour la phase précédente, cette phase était répartie sur plusieurs réunions et articulée avec d'autres. Elle visait à discuter des conditions, principalement matérielles et spatiales, nécessaires à l'activité future de l'enseignant et des élèves en classe avec des tables interactives. Les résultats mettent en avant l'intérêt de pouvoir intervenir en conception sur les pratiques futures des enseignants pionniers avec les tables interactives. **L'intégration de ces dernières dans le système d'instrument** a ainsi été favorisée, et l'anticipation des expérimentations en situation réelle a fait émerger des **usages innovants** peu abordés auparavant (cf. Tableau 18).

Méthodes		Processus
Co-construction	Scénarios pédagogiques uniquement	Intégration Pratique
Participation	Rôle d'enseignants pionniers	Innovation Pratique
Confrontation	Simulation physique	
Cadrage	Plan de classe et matériel disponible	

Tableau 18. Méthodes et des processus de conception dans la phase de préparation des expérimentations en classe

La mise en place d'expérimentations en classe avec l'application de simulation tangible et les scénarios pédagogiques reformulés constituaient un objectif commun à l'ensemble des concepteurs, plaçant ainsi les enseignants comme des « pionniers ». Elle a donné lieu à des modifications des scénarios pédagogiques concernant principalement la projection de l'application tangible (cf. Figure 45).

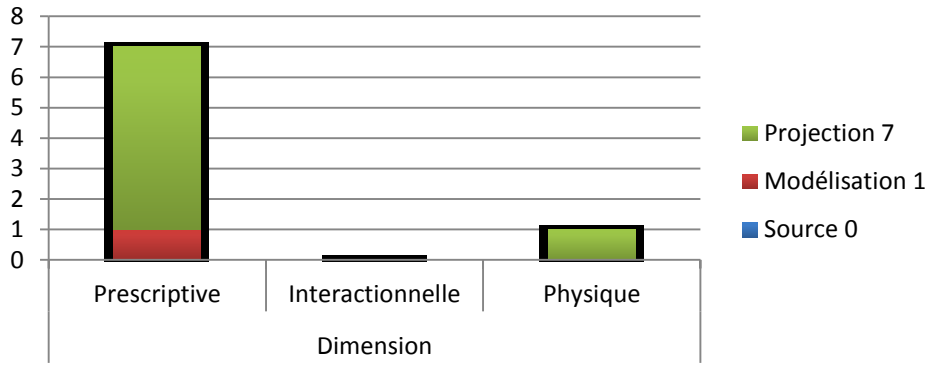


Figure 45. Dimensions des choix de conception dans la phase de préparation des expérimentations en classe

En effet, en anticipant l'introduction des tables interactives dans le système d'artefacts existants en classe, les enseignants ont pu envisager concrètement leur activité avec la technologie émergente et discuter d'aspects opérationnels peu anticipés dans les autres phases. Bien qu'elle ait peu fait avancer le développement de l'application tangible de simulation en elle-même, elle est apparue indispensable en termes **d'intégration des tables interactives en situations d'enseignement**. Les participants se sont pour cela appuyés sur des connaissances variées, contrairement à la phase précédente, à la fois en termes de besoins existants (TK, TPK et PCK) et par rapport aux caractéristiques de la technologie ou aux hypothèses de conception antérieures (T*PK, T*CK et T*PACK) (cf. Figure 46).

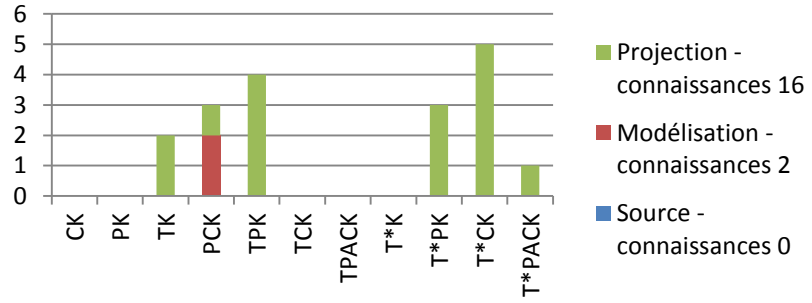


Figure 46. Connaissances mobilisées dans la phase de préparation des expérimentations en classe

Par rapport aux autres, cette phase est celle qui a mobilisé le plus de connaissances de type TK, TPK et T*PK. Celles-ci renvoyaient principalement aux question de contraintes d'espace en classe, de matériel nécessaire, des flux de personnes dans la classe et de leurs places, en simulant physiquement l'organisation spatiale et matérielle autour d'un plan de la future classe. Celui-ci a ainsi participé au cadrage du champ des possibles, en posant des contraintes spatiales et matérielles afin de préciser par exemple l'emplacement du vidéoprojecteur branché à une des tables interactives et le nombre d'élèves par table :

> *[Verbatim 14]* ***Génération de spécification prescriptive : le vidéoprojecteur relié à une table interactive doit être placé à côté de la celle qui est la plus proche du tableau, qui accueillera 4 élèves au plus***
> [ERGO 2] : Et le **vidéoprojecteur** finalement **il va où ?**
> [ENS 2] : Il est accroché **au plafond**.
> [ERGO 2] : Et celui qu'on ramène pour projeter ce qu'il y a sur la table [interactive] ?
> [ENS 2] : On **pourra le caler** sans problème, j'ai récupéré un **chariot à roulette** qui peut aller **ici** [sur le plan de salle]. [...]
> [ENS 1] : Du coup si tu mets le **rétro à côté de la table interactive**, ça veut dire qu'il faut qu'il n'y ait **que 4 élèves sur celle-là**, **sinon ils seront serrés**.

Cet exemple souligne l'intérêt du rôle d'enseignants pionniers des participants impliqués, car les choix de conception prescriptifs formulés étaient alors adaptés à leurs besoins individuels (p. ex. le matériel et la salle de classe). Néanmoins, dans une moindre mesure (figure 47), cette phase a également donné lieu à des formes nouvelles **d'amélioration dans leurs pratiques** peu discutées jusque-là liées à l'utilisation de la projection.

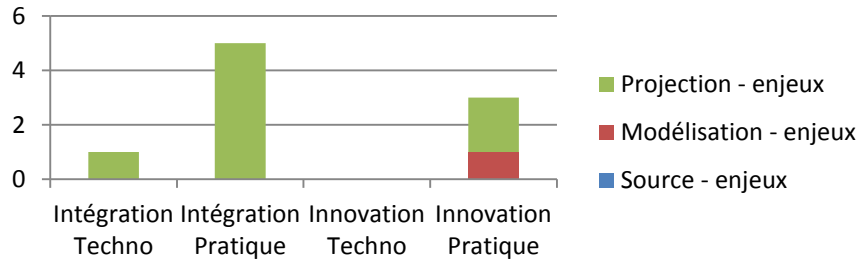


Figure 47. Processus engagés dans la phase de préparation des expérimentations en classe

En effet, dans le verbatim 15, le fait de considérer le système d'instrument de l'enseignant a permis aux participants de prendre de la distance par rapport à l'application tangible, et de discuter de ses usages collectifs plutôt qu'individuels. L'idée de faire intervenir un élève sur l'application tangible, devant le reste de la classe pendant la correction d'exercices a alors émergé pour la première fois dans cette phase.

> [Verbatim 15] **Génération d'exigence prescriptive** : ***projeter la simulation pour corriger les exercices en classe***
> [ENS 1] : ***Dans les corrections d'exercices*** *qu'on propose et qu'on corrige dans la séance suivante, on y fait* ***appel*** *aussi* ***au modèle, pour expliquer****.*
> [ERGO 2] : *Est-ce que ça pourrait être intéressant* ***que toi pendant la correction tu utilise la projection*** *de ce qui est sur la table ? Que toi tu aies recours au* ***modèle pour expliquer aux élèves*** *le modèle ?*
> [ENS 2] : *Ou* ***un élève*** *!*
> [ERGO 2] : *Oui, voilà exactement ! Ça sort un peu du scénario, mais ça reste* ***cohérent a priori avec l'application****.*
> [ENS 1] : *Ouais* ***plutôt que de faire nos traits de couleurs*** *sur le tableau pour expliquer...*

3.1.7 Simuler l'activité future de l'activité de l'enseignant en classe

Cette étape de simulation visait à anticiper l'articulation entre les modes opératoires prévus et les fonctions constituantes. Pour cela, les scénarios reformulés ont servi de support pour simuler le déroulement du cours, en demandant aux enseignants d'expliciter ses actions et son discours comme en situation réelle. Cette phase a ainsi permis aux enseignants pionniers de confronter leurs hypothèses de conception. Bien que peu de choix de conception aient été formulés, ces derniers ont porté à la fois sur l'application tangible et sur le discours de

l'enseignant ou certaines étapes du scénario, en visant **l'intégration de la technologie** et **des pratiques,** ainsi que **l'amélioration de ces dernières** (cf. Tableau19).

Méthodes		Processus
Co-construction	Caractéristiques techniques et scénarios pédagogiques	Intégration Pratique
Participation	Rôle d'enseignants pionniers	Innovation Pratique
Confrontation	Simulation de l'activité avec le prototype	Intégration Techno
Cadrage		

Tableau 19. Méthodes et des processus de conception dans la phase de simulation de l'activité future de l'enseignant

Comme dans la phase précédente, le fait de prendre de la distance par rapport à l'application tangible, en considérant chaque TP-cours dans son intégralité, a permis d'aborder des aspects de la pratique des enseignants pionniers peu discutés jusque-là. C'est notamment le cas du discours de l'enseignant face aux élèves, autour l'application tangible. Deux choix de conception renvoyant à des **processus d'intégration** ont été formulés : du discours par rapport à la technologie, et inversement. L'un a porté sur la génération d'une exigence prescriptive, c'est-à-dire l'ajout dans le discours d'une introduction de la technologie par l'enseignant, et l'autre sur la transformation d'une spécification physique, plus précisément la forme d'une image de source lumineuse qui était en contradiction avec le discours habituel de l'enseignant (cf. verbatim 16).

> *Verbatim 16]* ***Transformation de spécification physique : l'image du soleil doit être remplacée par une image de ciel avec un soleil plus petit et des nuages autour***
> [ENS 2] : Le problème c'est qu'**on leur a dit juste avant de ne pas regarder le** soleil (lors de l'expérience réelle). **Là on leur dit de regarder le soleil** pour avoir le spectre (dans la simulation). C'est l'opposé.
> [DIDACT] : Et si **on fait un tout petit soleil** ? Tu vois si l'image qui est là…
> [ENS 1] : Ah oui un petit soleil d'accord.
> [DIDACT] : Du coup on aurait notre objet qui est posé et **un petit soleil à côté et des petits nuages autour.**
> [ENS 2] : Ça, c'est pas mal, **ça serait bien**. Ça serait un **bon compromis.**
> [DIDACT] : Donc on **change le dessin du soleil pour celui d'un ciel**.
> [ENS 2] : Donc ça veut dire qu'on aura **l'objet et à côté un ciel avec un tout petit soleil**.

Ce verbatim est intéressant dans la mesure où il illustre le rejet d'une hypothèse antérieure et la solution trouvée pour représenter une source lumineuse de façon cohérente avec les consignes de l'enseignant, grâce à la simulation. De plus, en parcourant les différentes étapes de la démarche d'investigation lors de la simulation, deux transformations d'exigence prescriptives ont été formulées concernant la projection de l'application tangible au tableau. Elles avaient pour but de préciser son rôle dans la réponse de la classe et de faire intervenir un

élève dans cette étape, afin **de bénéficier des nouvelles représentations** proposées par l'application tangible (cf. verbatim 17).

> *[Verbatim 17]* ***Transformation et génération d'exigences prescriptives*** *en lien avec la projection de l'application tangible :* ***la projection doit être utilisée par l'enseignant dans la phase de « réponse de la classe » avec les élèves assis à leur place***
> [ERGO 2] : À quel moment du cours tu penses que tu peux utiliser la projection ?
> [ENS 2] : Dans la partie **réponse de la classe**, c'est une **sorte d'institutionnalisation** qui va se mettre **avant le bilan**. Les élèves vont faire une **sorte de correction de ce qu'ils auront fait** avant et c'est là qu'**on va discuter**, **se mettre d'accord sur leurs conclusions** et là c'est le **moment où** justement **on projette.** D'ailleurs à ce moment-là **les élèves ils sont où** ? Autour des tables interactives ? Assis à leur place ?
> [DIDACT] : Il vaut mieux les **renvoyer à leur place**, tu ne vas pas les laisser debout les pauvres.
> [ENS 2] : Ok mais le problème c'est qu'**à leur place**, **ils regardent un mur,** donc **il faut qu'ils tournent** leur chaise.
> [ERGO 2] : Donc tu les fais se lever juste le temps de manipuler la simulation ?
> [ENS 2] : Oui.

Quantitativement, il est surprenant que cette phase, centrée sur des techniques de simulation, ait produit un si petit nombre de choix de conception. Cependant, d'un point de vue qualitatif, ces choix étaient porteurs d'un niveau de détails particulièrement important pour le déroulement de l'activité de l'enseignant notamment. C'était par exemple le cas des usages prévus de la projection dans l'étape de restitution collective, qui renvoie à **l'adaptation des scénarios pédagogique, à la fois pour y intégrer ces usages** et pour **mettre en avant leurs apports**, c.-à-d. pour favoriser les échanges avec les élèves (cf. Figure 48).

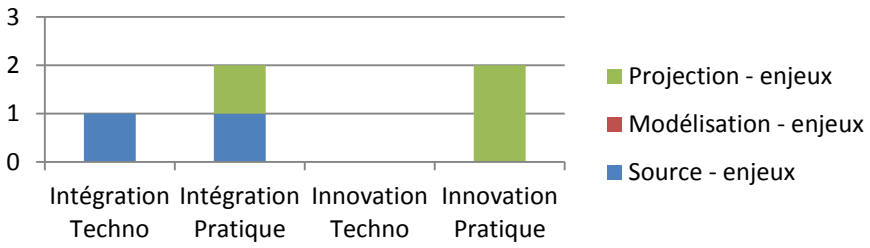


Figure 48. Processus engagés dans la phase de simulation de l'activité future des enseignants

Dans les deux cas, les analyses montrent que les justifications des choix de conception renvoyaient à des **connaissances plus intégrées** que dans les phases précédentes (cf. figure 49) :

- leur activité de référence, lorsqu'ils font réaliser des expériences aux élèves (TPACK) ;
- des hypothèses de conception antérieures sur les usages des tables interactives (T*CK, T*PK et T*PACK).

Cela s'explique par le fait que cette forme de confrontation par la simulation a demandé aux participants d'articuler les modalités de représentation de l'application tangible, avec des connaissances de type PCK, telle que son discours (verbatim 16) ou son activité dans certaines étapes du TP-cours (verbatim 17)

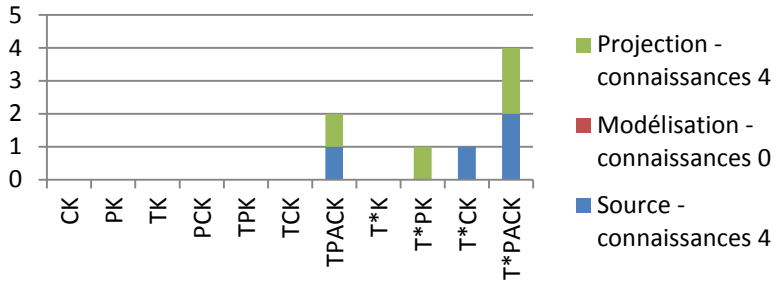


Figure 49. Connaissances mobilisées dans les phases de simulation de l'activité future des enseignants

3.1.8 Mettre en œuvre des solutions en situation réelle

Cette phase était centrée sur la confrontation au réel des résultats de l'activité des concepteurs lors des deux sessions d'expérimentations en classe. Les échanges avec les enseignants pionniers ont permis d'évaluer des choix de conception antérieurs et d'en transformer ou d'en générer d'autres, relatif aussi bien à l'application tangible qu'aux scénarios pédagogiques. En tenant compte de l'activité d'apprentissage des élèves, les choix de conception formulés visaient principalement à mieux **adapter l'application tangible** ou à **améliorer ses usages** par rapport à ce qui était prévu dans les scénarios pédagogiques. Le tableau suivant résume ce bilan.

Méthodes		**Processus**
Co-construction	Caractéristiques techniques et scénarios pédagogiques	Intégration Techno
Participation	Rôle d'enseignants pionniers + implication des élèves	Innovation Pratique
Confrontation	Mise en œuvre en situation réelle	
Cadrage		

Tableau 20. Méthodes et processus dans la phase d'expérimentation en classe

Les 12 choix de conception relevés dans cette phase se distinguent de ceux des autres phases, car ils découlent des entretiens hebdomadaires avec un enseignant après les cours intégrant

l'application de simulation tangible. Au cours de ces entretiens, l'enseignant pionnier revenait sur la mise en œuvre des solutions de conception en situation réelle, avec des élèves, sans que l'enseignante-chercheure en didactique ne soit leur intermédiaire. Cela a permis de proposer des modifications et d'évaluer des hypothèses de conception antérieures concernant à la fois les dimensions physiques et prescriptives cf. Figure 50).

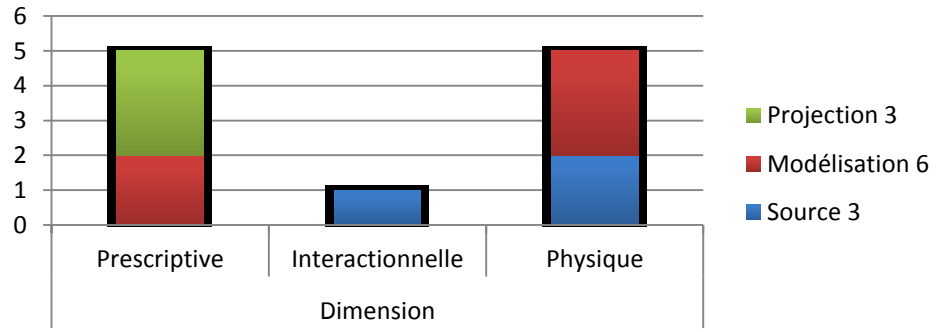


Figure 50. Dimensions des choix de conception dans la phase d'expérimentation en classe

En premier lieu, l'implication des élèves a permis d'enrichir le processus de conception global. Des évaluations positives concernant l'activité des élèves ont par exemple validé **l'intérêt de faire intervenir un élève sur l'application tangible** devant la classe dans la réponse de la classe, ce qui était **difficile en situation d'enseignement habituel** (verbatim 18).

> *[Verbatim 18]* ***Évaluation de solution prescriptive*** *lors des expérimentations en classes :* ***sur l'intervention d'un élève sur l'application tangible pendant la réponse de la classe***
> [ERGO 2] : À un moment **tu as fait intervenir un élève dans la réponse de la classe** [en projetant au tableau]… […]
> [ENS 2] : **C'était bien hier**, mais **aujourd'hui je n'ai pas su faire**. Tu as vu ?
> [ERGO 2] : Oui hier c'était **très dynamique**, il y avait **un élève qui manipulait** et **tu interagissais avec le reste des élèves**. Alors qu'**aujourd'hui** tu interrogeais seulement l'élève qui manipulait les objets tangibles.
> [ENS 2] : Oui je suis d'accord, mais **aujourd'hui je n'ai pas su faire**.
> [ERGO 2] : Et tu penses que ça vaut le coup ou que c'est gadget ?
> [ENS 2] : Non **c'était très bien ce qui s'est passé hier**.

Cependant, cet exemple montre que l'activité de l'enseignant pionnier n'était pas stabilisée. Il devait encore s'approprier l'application tangible pour bénéficier pleinement des usages anticipés en réunion ou pour en proposer de nouveaux. Malgré ce manque d'appropriation, cet exemple montre que les expérimentations en classe ont néanmoins permis de valider ou de rejeter certaines hypothèses de conception. Les enseignants pionniers s'appuyaient pour cela principalement sur leur expérience immédiate avec les tables interactives et les scénarios

pédagogiques reformulés, ce qui correspond à des connaissances de type T*PACK. C'est pourquoi ces dernières étaient prépondérantes dans les justifications des choix de conception (cf. Figure 51)

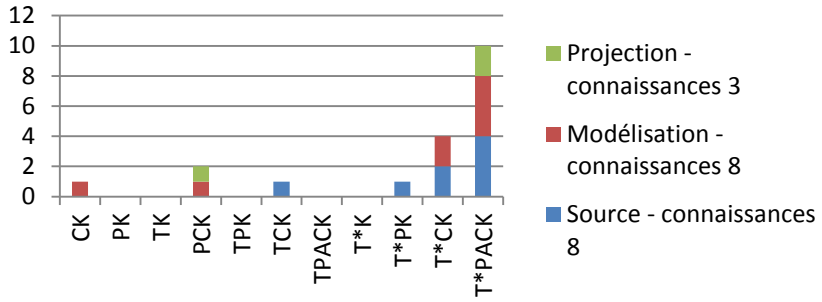


Figure 51. Connaissances mobilisées dans la phase de mise en œuvre de la solution en situation réelle

Lorsqu'une hypothèse n'était pas validée, des solutions alternatives étaient proposées, de la part de l'enseignant pionnier ou de l'ergonome. Par exemple dans le cas du verbatim 19, l'enseignant a constaté des manipulations non prévues de la part des élèves, en contradiction avec les objectifs de l'enseignant (c.-à-d. ne pas observer directement le soleil). Celui-ci a donc proposé d'ajouter un message textuel pour guider l'activité des élèves.

> *[Verbatim 19]* ***Génération de spécification physique*** *concernant la source lumineuse lors des expérimentations en classes :* ***ajouter un message lorsque le spectroscope est dirigé directement vers l'image du soleil : « Attention il ne faut pas regarder directement le soleil »***
> [ENS 2] : Tu sais dans la représentation du ciel, il y a un soleil. Des élèves ont tourné le soleil pour le mettre pile en face du spectroscope.
> [ERGO 2] : Alors que tu leur précisais de ne pas observer directement le soleil ?
> [ENS 2] : Oui, alors je sais ce qu'on pourrait faire : On pourrait afficher un message « attention il ne faut pas regarder directement le soleil ». Parce que ça ne doit pas être compliqué à programmer.

Dans d'autres cas, le rejet d'une hypothèse n'entraînait pas la proposition d'une solution. Ainsi, les objets tangibles génériques ont été abandonnés, car leur utilisation posait des difficultés à l'enseignant dans la gestion de l'avancement de son cours. Il en a donc conclu que ces types d'objets tangibles n'étaient pas adaptés à une utilisation par les élèves. Ce résultat peut être vu comme une forme **d'apprentissage**, sur l'articulation entre l'interface tangible et la pratique enseignante, rendue possible par la confrontation au réel, et surtout à l'activité des élèves.

En outre, l'ergonome s'est appuyé sur ses observations pour proposer des modifications de l'application tangible afin **d'enrichir le contenu du cours**, comme dans l'exemple suivant sur l'ajout d'une bougie parmi les sources simulables (verbatim 20).

> *[Verbatim 20]* ***Transformation de spécification physique : ajouter une source tangible bougie***
> [ERGO 2] : **Dans la correction** des exercices aujourd'hui, tu as donné **l'exemple d'une bougie** demandant quel était son spectre. Est-ce que ça t'intéresserait d'avoir une **bougie parmi les sources lumineuses déjà disponibles** ?
> [ENS 2] : J'en ai rêvé !
> [ERGO 2] : Ça permettrait **d'utiliser la table pour** illustrer **d'autres parties du cours.**

L'enseignant a également été force de proposition pour modifier les scénarios pédagogiques, avec en particulier la proposition d'utiliser l'application dans l'évaluation de fin de séquence (verbatim 21) :

> *[Verbatim 21]* ***Génération d'attente : utiliser l'application tangible avec la modélisation dans la phase d'évaluation***
> [ENS 2] : Ça serait intéressant de **faire l'évaluation notée avec l'application tangible.**
> [ERGO 2] : C'est vrai qu'on ne sait pas s'ils manipulent tous finalement. Est-ce qu'ils sont **tous capables de refaire une simulation ?**
> [ENS 2] : Oui on pourrait **voir ça dans l'évaluation**.

Ces deux exemples peuvent être considérés comme des formes de conception dans l'usage (médiatisée par l'ergonome), car les sujets sur lesquels ils portent n'avaient jamais été en réunion de conception. Ainsi, la confrontation à la nouvelle technologie en situation réelle a permis à l'enseignant pionnier d'explorer les possibilités qu'elle pouvait offrir, en vue **d'améliorer son enseignement**. Cela explique la prédominance des processus d'innovation dans les hypothèses formulées (cf. Figure 52).

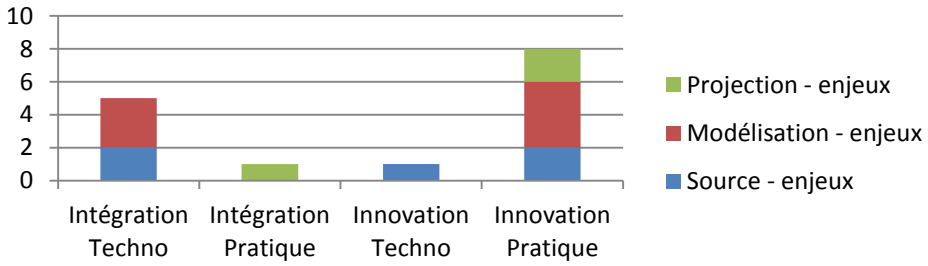


Figure 52. Processus engagés dans la phase d'expérimentation en classe

3.1.9 Faire le bilan sur les expérimentations en classe

Cette étape a mis en avant le rôle d'enseignants pionniers dans la confrontation de leur activité d'enseignement avec les produits de la conception. Les hypothèses de conception s'appuyaient en effet sur différents aspects de cette activité afin **d'améliorer l'enseignement**

et l'apprentissage avec ces produits. Cependant, les **processus d'intégration** sont également apparus prépondérants pour soutenir ces innovations potentielles (cf. Tableau 21).

Méthodes		Processus
Co-construction	Caractéristiques techniques et scénarios pédagogiques	Innovation Pratique
Participation	Rôle d'enseignants pionniers	Intégration Techno
Confrontation	Allo-confrontation collective + REX	Intégration Pratique
Cadrage		

Tableau 21. Méthodes et des processus de conception dans la phase de bilan sur les expérimentations en classe

Les résultats des expérimentations en classe ont été synthétisés par les ergonomes, notamment en termes d'apports et de limites du couple application tangible-scénarios pédagogiques adaptés ou d'imprévus. Cette synthèse a été présentée aux participants afin d'en discuter pour poursuivre la conception de l'application tangible et les scénarios pédagogiques. Outre cette synthèse, 12 extraits des enregistrements vidéo des expérimentations en classe ont été projetés afin de les faire discuter par les participants, sous la forme d'une allo-confrontation collective. Les extraits ont été sélectionnés au regard des hypothèses de conception, afin de mettre en avant l'activité des élèves, leurs interactions avec l'application tangible, les apports de celle-ci, les difficultés rencontrées et les imprévus.

Sur les 7 choix de conception relevés, 5 d'entre eux correspondaient à des modifications de spécifications physiques ou prescriptives. Les 2 autres ont porté sur l'évaluation de solution d'un point de vue interactionnel et prescriptif (cf. Figure 53).

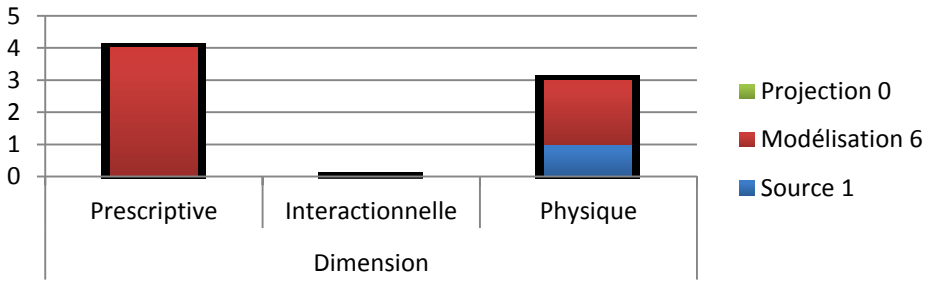


Figure 53. Dimensions des choix de conception dans la phase de bilan sur les expérimentations en classe

Ces modifications des hypothèses de conception sont apparues moins incrémentales que dans les autres phases :

- changement de métaphore pour les sources lumineuses et de représentation globale de la modélisation ;
- ajouts d'explications dans le discours de l'enseignant sur la plus-value des niveaux de modélisation proposés dans l'application tangible ;
- modification des tâches des élèves pour préciser ce que l'enseignant attend d'eux.

Cette phase a également montré les ajustements à chaud réalisés par l'enseignant, concernant notamment les modes opératoires prévus dans les scénarios pédagogiques. Par exemple dans le verbatim 22, l'enseignant a dû adapter son discours face à un bug de l'application et le compenser lors des échanges avec les élèves. Ces ajustements renvoient à des **compétences acquises sur le tas** par les **enseignants pionniers** (Pastré & al., 2006)**,** lors des expérimentations en classe permettant **d'intégrer l'application tangible dans le cours**.

> *[Verbatim 22]* ***Évaluation de la solution prescriptive : validation des objectifs d'apprentissage liés au modèle et sur le statut de la simulation par rapport à la réalité***
> [ERGO 2] : Face à un **bug dans le modèle**, C'est intéressant de voir que **des élèves ont compris ce qu'il aurait dû y avoir** normalement. Et pour toi [ENS 1], quand tu as **découvert ce bug** […], dans le [groupe suivant] suivant tu l'as **contourné** en évitant par exemple de distribuer l'objet blanc et en verbalisant sur ce qu'il devrait donner dans le modèle sans le poser.
> [ERGO 1] : Mais là les élèves le **découvrent d'elles-mêmes**, c'est bien ça, ça montre **qu'elles ont compris**
> [ENS 2] : Oui tout à fait, ils ont découvert les **limites de l'outil**.
> [ENS 1] : **Ça fait plaisir à voir.**

Par ailleurs, les concepteurs ont principalement formulé des choix de conception destinés à améliorer les activités d'enseignement et d'apprentissage par rapport aux difficultés constatées dans les expérimentations. Il s'agissait donc de corrections de choix de conception précédents, afin de **favoriser l'intégration de l'application tangible**. Ces processus intégration apparaissaient alors comme une **condition au développement des pratiques** en ce que le manque d'adaptation de l'application aux pratiques enseignantes, ou l'inverse, rendait difficile la mise en œuvre d'usages innovants (cf. Figure 54).

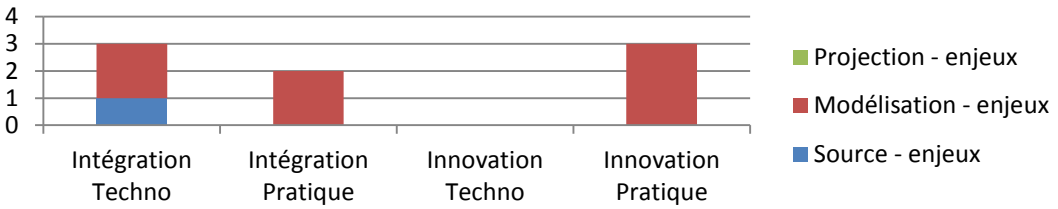


Figure 54. Processus engagés dans la phase de confrontation des résultats des expérimentations en classe

D'un point de vue constructif, cette phase a également joué un rôle pour les **apprentissages des concepteurs** lorsqu'ils ont mobilisé des effets attendus d'une hypothèse antérieure comme justification d'un nouveau choix de conception, en tant que connaissance. Dans le verbatim 23, l'enseignante-chercheure en didactique revient sur un effet attendu plus tôt dans le processus de conception, en tant qu'hypothèse. Le fait que cette hypothèse n'ait pas été vérifiée lors des expérimentations en classes a alors servi de justification pour transformer une consigne afin de rendre la tâche d'apprentissage plus claire pour les élèves. D'après les participants, cela devait permettre aux élèves de mieux articuler les niveaux de représentation proposés sur la table interactive et, ainsi, améliorer leur compréhension de l'optique.

> [Verbatim 23] **Transformation d'exigence prescriptive** : ***proposer aux élèves une tâche de comparaison de ce qu'ils voient dans le modèle par rapport au réel et à la simulation***
> [ERGO 2] : *Quand on est dans la réalité, on part de **phénomènes** et d'objets **réels** avec les expériences, ensuite on passe à la **virtualité augmentée** où on passe sur la table interactive avec de nouveaux objets, de nouvelles images et de nouvelles représentations. Le **modèle interactif**, c'est pareil, on a de nouvelles images avec les schémas, et par contre quand on revient au **modèle**, souvent le modèle interactif était projeté au tableau et complété pour avoir ce modèle. Du coup, on a **moins de différence entre ces deux derniers niveaux de représentation**.*
> [DIDACT] : *En gros, on arrive à **confondre des modèles scientifiques** pour la synthèse additive ou soustractive ou **le modèle de l'optique** géométrique, etc**. avec ce truc-là** [le modèle interactif]…*
> [ENS 2] : *Qui sert de modèle !*
> [DIDACT] : *De modèle de substitution. Et moi j'avais fait **l'hypothèse que le modèle interactif** permettrait de **combiner les différents niveaux de représentation pour arriver au modèle**.*
> [ERGO 2] : *Oui on avait tous fait cette hypothèse en fait.*
> [DIDACT] *Et là ce qui m'embête c'est qu'on a moins ce **lien entre réel et modèle scientifique** au final. Donc **on va revoir les textes des activités pour renforcer ce lien** en **demandant aux élèves de bien comparer** avec la réalité par exemple. On peut leur dire qu'on va leur donner un objet qui permet de voir la situation différemment et après **leur demander d'identifier ce qu'on voit** dans le modèle qu'on ne voyait pas avant ou qu'est-ce qu'on ne voit plus. Par exemple la **source de lumière** dans le modèle, on ne voit plus le ciel, les nuages ou le soleil parce que ce n'est **pas important dans le modèle : on ne voit qu'un point**. Parce que **sinon** on leur donne ça, mais **ils ne savent pas quoi en faire.** Alors que s'ils **doivent repérer les différences**, ça les oblige à **faire des allers-retours avec la simulation ou le réel.***
> [ERGO 2] : *Oui il faut leur donner une tâche à réaliser, un objectif, parce que là c'est un trop contemplatif. Comme un problème à résoudre pour qu'ils soient moins passifs*

3.2 Synthèse des résultats

3.2.1 Caractéristiques des choix de conception sur l'ensemble de la démarche

Au total, 80 hypothèses de conception ont été recueillies concernant les composantes tracées, lors des 14 réunions de conception et des 2 phases d'expérimentations en classe. Les choix de conception prescriptifs, c.-à-d. les modifications des scénarios pédagogiques existants, comptent pour 36,25 % de l'ensemble de ces choix de conception. Au regard de la méthode de construction conjointe du système technique et des pratiques enseignantes, cela montre que la **reformulation des scénarios pédagogiques** a pris une place non-négligeable dans la conception. Elle a ainsi permis d'engager principalement des **processus d'innovation dans les pratiques enseignantes**, mais également des **processus d'adaptation de ces pratiques aux caractéristiques des tables interactives**.

En outre, sur l'ensemble du processus, la phase de *reformulation des scénarios existants et d'élaboration de la solution technique* et la phase de *confrontation des participants au prototype* ont été les plus fructueuses en termes de choix de conception formulés (cf. Figure 55).

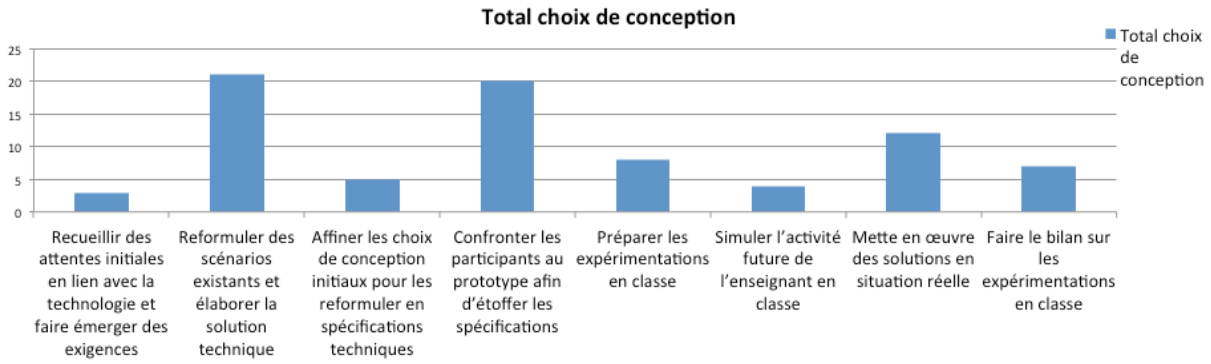


Figure 55. Synthèse du nombre de choix de conception par phase

Ce résultat s'explique en partie par le fait qu'elles aient nécessité plus de temps dans les réunions que les autres phases. À notre sens, il met également en avant l'intérêt de la combinaison des méthodes dans chacune de ces phases pour favoriser la formulation d'un grand nombre de choix de conception. Ces choix étant appartenant à des processus d'intégration/innovation, nous interprétons ces résultats ainsi :

- la **construction conjointe** des caractéristiques **d'une application tangible** et **des scénarios pédagogiques** par des **enseignants pionniers** s'appuyant **leurs scénarios pédagogiques**, sur des **maquettes** basse fidélité et sur un **démonstrateur** a considérablement favorisé les **processus d'innovation dans leurs pratiques** d'enseignement et **d'intégration de l'application** dans ces pratiques
- la **confrontation** des **enseignants co-concepteurs** au **prototype** visant à enrichir l'application tangible uniquement a considérablement favorisé les **processus d'intégration de l'application** dans leurs pratiques enseignantes.

3.2.2 Synthèse des méthodes et des processus d'intégration/innovation par phase

Le tableau suivant synthétise les caractéristiques méthodologiques de la conception et les processus d'intégration ou d'innovation engagés par les concepteurs dans chaque phase. Cette synthèse donne des éléments de réponses concernant les effets des méthodes utilisées sur les processus d'intégration/innovation engagés dans les différentes phases. Cependant, elle informe peu sur le rôle des apprentissages en conception. Afin de les résultats discutés précédemment phase par phase, les parties suivantes reprennent certains d'entre eux à l'échelle de la démarche de conception globale pour affiner notre discussion par rapport aux questions posées en début de chapitre

	Phases	**Caractéristiques méthodologiques**				**Processus engagés** (par ordre d'importance)
		Construction conjointe des pratiques et des artefacts	Implication des utilisateurs	Confrontation des hypothèses de conception	Cadrage de la conception	
3.	Construire un référentiel commun entre participants et ergonomes		Enseignants **pionniers**		Présentation du potentiel technologique et recueil des besoins actuels	
1	Recueillir des attentes initiales en lien avec la technologie	**Usages** possibles des tables interactives	Enseignants **pionniers**			**Innovation** **Pratique** **Innovation** **Techno**
2	Reformuler les scénarios existants et formuler des exigences	Caractéristiques **techniques** et **scénarios** pédagogiques	Enseignants **pionniers**	Démonstrateur et maquettes papier	Scénarios pédagogiques existants	**Innovation** **Pratique** **Intégration** **Techno** **Innovation** **Techno**
3	Affiner les exigences pour les reformuler en spécifications techniques	Caractéristiques **techniques** uniquement	Enseignants **co-concepteurs**	Story-boards, démonstrateur et maquettes		**Intégration** **Techno** **Innovation** **Pratique**
4	Confronter les participants au prototype afin d'étoffer les spécifications	Caractéristiques **techniques** uniquement	Enseignants **co-concepteurs**	Prototype		**Intégration** **Techno**
5	Préparer les expérimentations en classe	**Scénarios** pédagogiques uniquement	Enseignants **pionniers**	Simulation physique	Plan de classe et matériel disponible	**Intégration** **Pratique** **Innovation** **Pratique**
6	Simuler l'activité future des enseignants en classe	Caractéristiques **techniques** et **scénarios** pédagogiques	Enseignants **pionniers**	Simulation de l'activité avec le prototype		**Intégration** **Pratique** **Innovation** **Pratique** **Intégration** **Techno**
7	Mettre en œuvre des solutions en situation réelle	Caractéristiques **techniques** et **scénarios** pédagogiques	Enseignants **pionniers** + implication des **élèves**	Mise en œuvre en situation réelle		**Innovation** **Pratique** **Intégration** **Techno**
8	Faire le bilan sur les expérimentations en classe	Caractéristiques **techniques** et **scénarios** pédagogiques	Enseignants **pionniers**	Allo-confrontation collective + REX		**Innovation** **Pratique** **Intégration** **Techno** **Intégration** **Pratique**

Tableau 22. Synthèse des méthodes de conception et des processus d'intégration/innovation de chaque phase

3.2.3 Liens entre méthodes de conception et processus d'intégration/innovation

3.2.3.1 Bilan sur les processus d'intégration et d'innovation en conception

La synthèse du tableau 22 montre que les **processus d'innovation dans les pratiques** enseignantes et **d'intégration de l'application tangible** dans ces dernières étaient prépondérants dans la plupart des phases de la conception. Les **processus d'innovation technologique** et **d'intégration des pratiques par rapport aux caractéristiques des tables** interactives étaient quant à eux davantage liés à certaines phases. Toutes phases confondues, il apparaît que les processus d'intégration de l'application tangible aux pratiques enseignantes ont été le plus souvent associés aux hypothèses des concepteurs (cf. Figure 56)

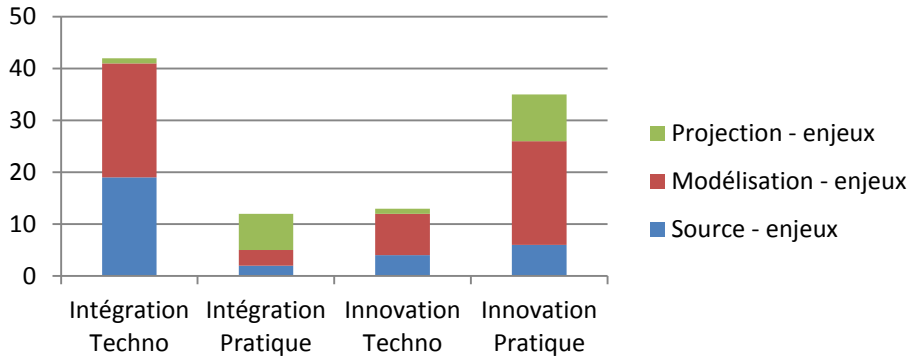


Figure 56. Processus d'intégration et d'innovation sur toute la démarche de conception

La figure suivante résume la répartition de processus d'intégration/innovation pour chaque phase de la conception afin de discuter des effets des méthodes de conception dans les parties suivantes.

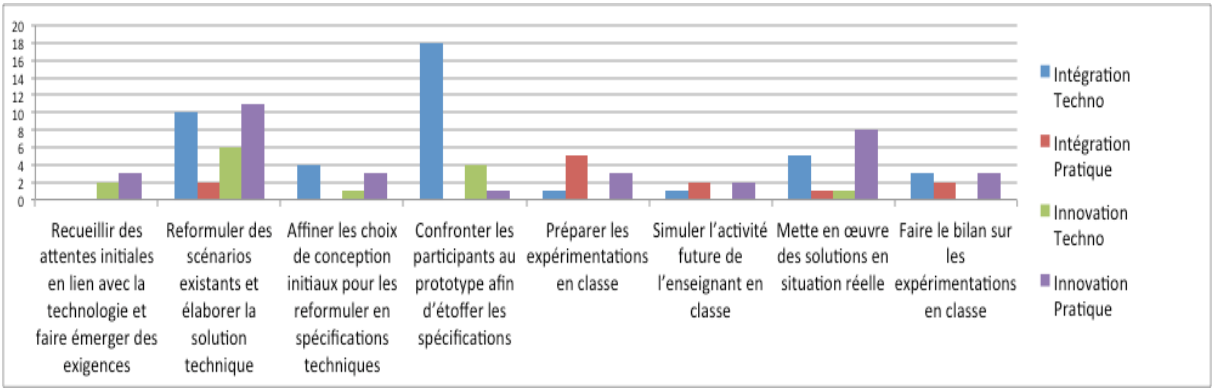


Figure 57. Répartition des types de processus d'intégration/innovation par phase

3.2.3.2 Adaptation du système technique aux pratiques et aux besoins des enseignants

Ce processus a été prépondérant dans les phases de *reformulation des scénarios existants et de formulation des exigences* (2), *d'affinage des choix de conception pour les reformuler en spécifications* (3), de *confrontation des participants au prototype* (4), *d'expérimentations des solutions en situation réelle* (7) et de *bilan sur ces expérimentations* (8).

En premier lieu, la définition des caractéristiques de l'application tangible en partant de zéro a offert les marges nécessaires à l'élaboration de représentations et d'usages adaptés aux besoins des enseignants. Ces besoins avaient été recueillis au début du processus et réinjectés par les ergonomes ou, le plus souvent, par les participants eux-mêmes. À ce titre, la mobilisation et l'adaptation de scénarios pédagogiques existants a permis de cadrer ces questions d'intégration en cristallisant les usages que devait permettre l'application tangible de simulation.

En tant que co-concepteurs, les participants ont alors pu intervenir au niveau des spécifications de l'application tangible. Les différents objets intermédiaires (croquis, maquettes papier et prototypes) proposés se sont révélés essentiels à plusieurs niveaux. D'une part ils participaient à l'avancement de la conception en cristallisant les choix passés et, d'autre part, ils leur permettaient de se familiariser avec la technologie émergente et d'anticiper sa mise en œuvre dans leur activité future.

Dans ce second cas, le statut d'enseignants pionniers des participants leur a permis d'envisager les conditions, voire les obstacles potentiels à l'intégration des tables interactives dans leur pratique. Les modalités de confrontation de leurs hypothèses de conception (manipulation libre sur les itérations du prototype et expérimentations en classe) ont ensuite permis d'appréhender plus concrètement ces questions d'intégration. Cela a alors conduit les enseignants pionniers à formuler des choix de conception ne visant pas directement l'amélioration de leur activité directement, mais plutôt destinés à leur élaborer les conditions nécessaires à ces innovations.

En résumé, les caractéristiques suivantes des méthodes utilisées semblent donc avoir joué sur la formulation d'hypothèses relatives à ce processus d'adaptation du système technique aux pratiques enseignantes (les numéros entre parenthèses correspondent aux phases dans lesquels les résultats appuient nos dires) :

- La **définition du système technique** (2, 3, 4, 7 & 8) ainsi que **la mobilisation et la reformulation de scénarios existants** (2, 7 & 8) ;
- Les **différents rôles des participants impliqués** : co-concepteur (3 & 4) et enseignants pionniers (2, 7 & 8) ;
- Les formes suivantes de confrontation des hypothèses de conception : **maquettage** (2 & 3), **démonstrateur** (2 & 3), **prototype** (4 & 7) et **expérimentations en classe** (7) ;
- **L'analyse des besoins et leur mobilisation** en réunion de conception **(2).**

3.2.3.3 Adaptation des pratiques enseignantes aux caractéristiques des tables interactives

À l'inverse du précédent, ce processus a été le moins associé aux hypothèses des concepteurs sur l'ensemble du processus. Cela peut être dû au fait que, contrairement à l'application tangible, des scénarios préexistaient à la démarche de conception. De plus, ces scénarios avaient été conçus par les participants et éprouvés dans les classes des enseignants impliqués. Une autre explication pourrait être que les tables interactives, de par leurs caractéristiques, n'ont pas nécessité de modifications majeures des scénarios pédagogiques.

Ce processus d'adaptation des pratiques enseignantes aux caractéristiques des tables interactives a cependant été particulièrement présent, par rapport aux autres processus, dans les phases de *préparation des expérimentations en classe* (5) et de *simulation de l'activité future de l'enseignant* (6).

Ces phases ont vu les enseignants pionniers apporter des modifications aux scénarios pédagogiques, qui avaient déjà été reformulés dans les phases antérieures. Lors des ateliers de simulation physique et sur le prototype, plusieurs aspects opérationnels des pratiques enseignantes on dû être discutés. Il s'agissait en particulier concernant l'intégration des tables interactives dans le système d'instrument existant dans la classe. En outre, suite aux expérimentations en classe, l'allo-confrontation collective a permis aux participants d'ajuster les scénarios pédagogiques, par rapport aux discours et aux consignes des enseignants, liées aux tâches d'apprentissage des élèves. Ces ajustements représentaient des corrections nécessaires pour véritablement profiter des innovations envisagées par les concepteurs.

Bien que ce processus soit minoritaire relativement aux autres, il n'en ai pas moins présent, voire essentiel, pour l'intégration de la ressource pédagogique conçue. Il aurait été difficile de

l'aborder si les caractéristiques suivantes des méthodes de conception n'avaient pas été présentes :

- Le fait de pouvoir **reformuler des scénarios existants** (5, 6 & 8) ;
- Le rôle d'**enseignant pionnier** (5, 6 & 8) ;
- La **simulation physique** avec le plan de **classe (5**), la **simulation sur prototype** (6) et **l'allo-confrontation collective** (8).

3.2.3.4 Innovation technique par rapport au potentiel technologique des tables interactives

Comme le précédent, ce processus est apparu moins souvent dans les hypothèses de conception que les processus d'intégration du système technique dans les pratiques enseignantes et d'innovation par rapport aux pratiques enseignantes de référence. L'exploitation du potentiel technologique et interactive des tables interactives a constitué un objectif pour les concepteurs dans les phases de *recueil des attentes initiales vis-à-vis de la technologie* (1) et de *reformulation des scénarios pédagogiques existants et de formulation d'exigences* (2) principalement

Ces deux phases initiales faisaient suite à la présentation par les ergonomes de ces technologies émergentes lors de la construction du référentiel commun, notamment à l'aide d'un démonstrateur. Les tables interactives étant peu connues, des formes d'apprentissages ont pu avoir lieu chez les participants, pour qu'ils soient en mesure de s'appuyer sur leur potentiel technologique par la suite.

Néanmoins, ce sont les ergonomes qui ont surtout engagé ces processus d'innovation technologique, en proposant aux enseignants pionniers des solutions ou des alternatives par rapport à leurs besoins. Cela peut signifier que l'exploitation du potentiel des tables interactives n'étaient pas une priorité pour les participants, davantage centrés sur leur activité future et moins sur l'exploitation du potentiel technologique. Ce résultat met en avant l'importance du rôle d'intermédiaire entre une nouvelle technologie et leurs utilisateurs potentiels, bien que ça ne soit pas le seul rôle de l'ergonome en conception sur de nouvelles technologies.

En conclusion, les caractéristiques méthodologiques suivantes ont permis de formuler des hypothèses de conception en lien avec des processus d'adaptation des pratiques aux caractéristiques des tables interactives :

- La **définition de l'artefact** (1 & 2) ;
- Le **rôle d'enseignants pionniers** (1 & 2) ;
- Le **démonstrateur** (1 & 2) ;
- La **présentation** par les ergonomes **du potentiel technologique** des tables interactives (1).

3.2.3.5 Innovation dans les pratiques enseignantes par rapport à leur activité de référence

Ce processus a été le plus présent sur l'ensemble du processus. Hormis la phase de *confrontation des participants au prototype*, toutes les phases ont compté un grand nombre d'hypothèses de conception visaient l'amélioration des pratiques d'enseignement, sous différentes formes. D'un point de vue quantitatif, seules les phases d'*affinage des spécifications techniques* et de *préparation des expérimentations en classe* ont donné lieu à des hypothèses de conception visant davantage des questions d'intégration. Cependant les processus d'innovation dans les pratiques enseignantes étaient néanmoins très présents dans ces phases également.

L'implication d'enseignants a permis, dès les premières phases, de relever des limites, des obstacles ou des difficultés qu'ils rencontraient habituellement. En les articulant avec le potentiel technique et interactif des tables interactives, des usages innovants ont émergé, visant l'amélioration des situations d'enseignement et d'apprentissage de référence.

Les trois attentes relevées initialement renvoyaient aux souhaits des enseignants pionniers vis-à-vis de la technologie émergente, mobilisée comme une ressource pour la transformation des pratiques, en termes d'usages en classe. Ces derniers ont donc été rapidement identifiés et sont restés stables tout au long du processus, ce qui est en accord avec la notion de solution précoce en conception (Visser, 2009). Une exception notable concerne cependant l'utilisation de la simulation tangible dans l'évaluation des élèves lors d'une des phases expérimentales.

Ces usages initiaux ont ensuite conduit à la définition des caractéristiques de l'application tangible pour rendre possibles ces usages. Les maquettes papier, les croquis, le démonstrateur ou les story-boards ont à ce titre permis de faire évoluer ces caractéristiques techniques, voire même d'impacter les modes opératoires prévus des enseignants pionniers. En particulier, lors de la reformulation des scénarios pédagogiques existants, les participants ont étoffé leurs

représentations de la technologie, de ses usages potentiels ainsi que des fonctions ou des formes de représentations qu'elle propose.

Ces formes d'apprentissage leur ont permis d'envisager de nouvelles façons d'utiliser les tables interactives dans le cadre de leur enseignement, notamment grâce à l'avancement des objets intermédiaires. Globalement, certaines améliorations sont apparues tôt dans le processus (p. ex. l'ajout de sources lumineuses à simuler ou l'articulation entre plusieurs niveaux de représentation). D'autres ont émergé plus tard, grâce à l'utilisation d'objets intermédiaires (p. ex. les croquis ont permis de créer un niveau de représentation intermédiaire nouveau) ou aux formes de confrontation des hypothèses de conception (p. ex. le rôle de la projection précisé dans la simulation physique ou l'introduction de l'application tangible dans les évaluations notée lors des expérimentations en classe).

En résumé, les caractéristiques méthodologiques suivantes ont permis de formuler des hypothèses de conception relatives à des processus d'innovation dans les pratiques enseignantes :

- La **définition du système technique** (1, 2, 3, 6, 7 & 8) et la **mobilisation et l'adaptation de scénarios pédagogiques existants** (2, 5, 6, 7 & 8)
- Les **différents rôles des participants impliqués** : enseignant pionniers (1, 2, 5, 6, 7 & 8) ;
- Les **différentes formes de confrontation des hypothèses de conception :** les objets intermédiaires basse fidélité (2 & 3), le démonstrateur (1, 2 & 3), la simulation physique (5) et sur prototype (6), les expérimentations en classe (7) et l'allo-confrontation collective (8) ;
- **L'analyse des besoins** et **leur mobilisation** en réunion de conception (1 & 2 principalement)

3.2.3.6 Synthèse des effets des méthodes de conception sur les processus d'intégration/innovation

Les résultats ont mis en avant des interactions entre ces processus au fil de la conception. Les choix de conception relatifs à l'application tangible relevant **de processus d'innovation** dans les pratiques enseignantes étaient **généralement suivis** de choix de conception visant ensuite **l'intégration** de ces choix dans ces pratiques. Pour reprendre l'exemple du niveau intermédiaire de modélisation, le fait d'ajouter un spectre au modèle de l'optique géométrique était lié à deux types de processus. Il avait pour objectif premier à la fois de faciliter l'activité

de l'enseignant lorsqu'il aborde l'articulation entre l'expérience réel et le modèle correspondant, et en même temps de favoriser la compréhension des élèves. Par la suite cependant, de nombreux choix de conceptions ont porté sur les caractéristiques de ce nouveau niveau de représentation dans une visée d'intégration. Ce niveau devait être cohérent avec la physique, avec les objectifs de l'enseignant, avec son discours et avec le reste du contenu de l'application tangible. Ainsi, **les processus d'intégration/innovation étaient liés**, par exemple lorsque des propositions d'amélioration de l'enseignement dépendaient de l'utilisabilité de l'application tangible.

3.2.4 Liens entre méthodes de conception et processus d'apprentissage

Sur les 80 choix de conception relevés, 164 formes de connaissances ont été relevées. Parmi elles, 77 (47,0 %) correspondaient à des connaissances indépendantes de la technologie émergente et 87 (53,0 %) à des connaissances qui l'impliquaient (T*). La figure suivante décrit la répartition de ces connaissances par catégorie du modèle TPACK sur l'ensemble de l'activité de conception et pour chaque composante.

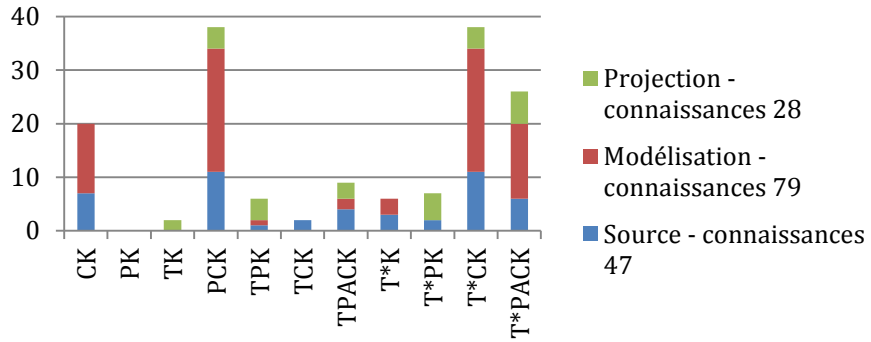


Figure 58. Répartition des connaissances mobilisées selon les catégories du modèle TPACK

Les connaissances relevées impliquant la technologie émergente correspondent à des **connaissances sur des caractéristiques technologiques et sur des hypothèses de conception antérieures.** Elles sont majoritairement en lien avec le contenu physique à représenter avec l'application tangible (T*CK) ou à sa mise en œuvre dans les activités d'enseignement et d'apprentissage (T*PACK).

Ainsi, en considérant que les participants avaient peu de connaissances sur la technologie en amont de la conception, celle-ci a pu avoir induit des **formes d'apprentissage en conception**

en cela que près de la moitié des justifications de choix de conception impliquent la nouvelle technologie et qu'elles varient selon les phases.

3.2.4.1 Analyse des apprentissages en conception d'après les connaissances mobilisées

En regroupant les phases similaires, des tendances apparaissent dans l'exploitation des connaissances des participants, il apparaît que :

- [Phases 1 & 2] Les participants se sont dans un premier temps appuyé principalement sur leurs besoins (**PCK & CK**) pour formuler des exigences prescriptives et physiques ;
- [Phases 3 & 4] Lorsqu'un les objets intermédiaires se sont développés, p. ex. le prototype, les transformations de spécifications physiques ont fait appel à des connaissances relatives aux modalités de représentation disponibles pour les enseignants (**T*CK**) ;
- [Phases 5 & 6] Pour anticiper la mise en œuvre de l'application tangible et des scénarios pédagogiques en situation réelle, les participants se sont ensuite appuyés sur leurs connaissances en lien avec le matériel existant et la nouvelle technologie (**TK, PCK, TPK, TPACK, T*PK, T*CK & T*PACK**) ;
- [Phases 7 & 8] Une fois les produits de la conception déployés en situation réelle, les évaluations et les transformations physiques et prescriptives ont reposé en majorité sur l'expérience, positive ou négative, des participants avec leurs élèves (**T*PACK**).

La figure ci-dessous illustre cette dynamique dans la mobilisation des connaissances des participants impliqués. Cette évolution rend compte selon nous de processus d'apprentissage. En effet, les phases 1 et 2, d'une part, et les phases 7 & 8, d'autre part, peuvent être vue comme le début et la fin du processus de conception. Par conséquent, en admettant que les participants avaient peu de connaissances sur les tables interactives et les interactions tangibles, on peut en déduire que les connaissances en lien avec la technologie émergente résultent d'apprentissages en conception. C'est d'ailleurs le cas de la majorité d'entre elles dans les phases 3 à 8.

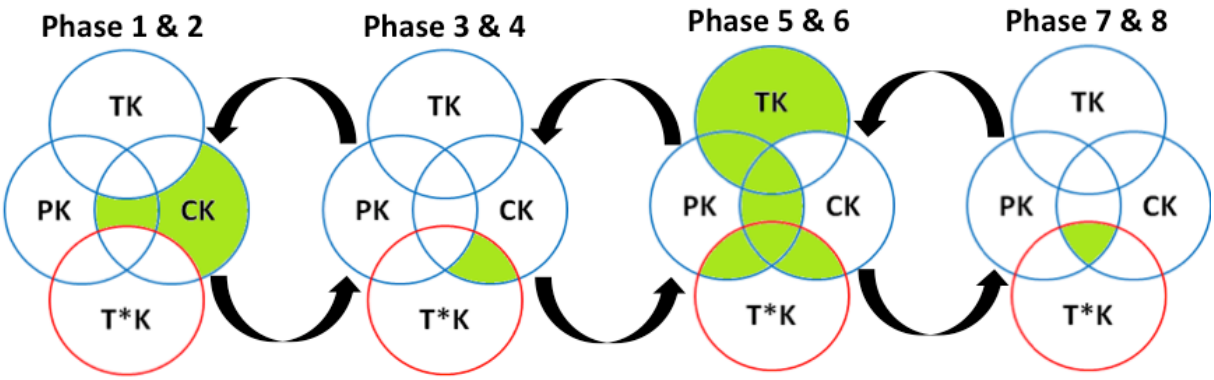


Figure 59. Principales connaissances mobilisées dans les phases de l'activité de conception

La présence de formes d'apprentissages chez des concepteurs en situation de conception participative n'étant plus à prouver (p. ex. Ehn, 1998 ; Béguin, 2003), nous admettons que de tels apprentissages portent sur la technologie émergente chez les participants. De plus, en situation de conception pour l'enseignement, des processus d'apprentissage ont déjà été relevés chez les enseignants (p. ex. Sanchez & Monaud-Ansaldi, 2015 ; Mishra & Koehler, 2005). Koehler, Mishra & Kereluik (2014) se sont intéressés au développement des connaissances de type TPACK dans le cadre de formations d'enseignants novices et expérimentés. Leur développement se ferait à partir de connaissances appartenant à d'autres catégories (p. ex. PCK ou TPK) ou en parallèle (p. ex. PCK).

Dans les phases 1 et 2, les résultats suggèrent que les participants ont engagé des processus d'apprentissage à partir de leurs **connaissances préexistantes** sur les contenus à enseigner et sur les techniques d'enseignement pour les faire acquérir aux élèves (**CK et PCK**). Dans ces phases, les **interactions** entre **l'avancement de l'application tangible** et celui des **scénarios pédagogiques** interrogent les **formes d'apprentissages** qui ont pu avoir lieu en conception. Par exemple, au début du processus, un usage des tables interactives a émergé concernant l'articulation entre un phénomène physique réel et sa modélisation. Cette proposition relative au contenu de l'enseignement a amené à la création d'un niveau de représentation intermédiaire entre la simulation et le modèle de l'optique géométrique, liée au contenu de l'application tangible. Ce contenu nouveau a alors ouvert de nouvelles possibilités en termes de pratiques enseignantes et a par la suite conduit à des modifications des scénarios pédagogiques pour l'introduire dès le début de la séquence. Ce type d'interaction entre le système technique et les pratiques enseignantes correspond à ce que Daniellou (2007) a décrit comme **l'ouverture de nouvelles formes de l'activité** rendues possibles par les décisions de

conception. Ces décisions, assimilables à nos hypothèses de conception, créent alors de l'inattendu ou de la nouveauté pouvant constituer des **formes d'apprentissage** (Béguin, 2013).

Dans les phases 3 et 4, les opportunités de **confrontation** avec les objets intermédiaires, et en particulier le prototype, les ont conduit enrichir leurs représentations vis-à-vis de la technologie émergente. Les participants ont ainsi pu construire de nouvelles connaissances concernant **les modalités de représentation des contenus à enseigner avec une table interactive (T*CK).** Les in**teractions des participants avec le prototype** ont ainsi favorisé **l'exploration du potentiel technologique**, mais aussi leur **prise en main** de l'application tangible. La confrontation au prototype a donc pu participer à des **formes d'apprentissages** liés à la technologie et aux modalités de représentation qu'elle offre.

En **anticipant les activités d'enseignement et d'apprentissages** dans leur ensemble dans les phases 5 et 6, ils ont pu formuler et confronter de nouvelles hypothèses sur la mise en œuvre de l'application tangible dans le cadre des scénarios reformulés. Ces **confrontations** ont donné lieu à la **construction de connaissances** sur la **dimension pédagogique** de ces activités (**T*PK**) ainsi que leur **combinaison** (**T*PACK**) avec les **T*CK construite** antérieurement et leurs connaissances préexistantes de type TK, TPK, TPACK et PCK.

Enfin, les phases 7 et 8 relatives aux **expérimentations en classe** ont permis aux participants de **s'approprier l'application tangible** et **d'acquérir des compétences** lors des régulations à chaud réalisées par l'enseignant. À ce niveau d'avancement de la conception, la justification de la transformation d'un choix de conception a parfois renvoyé à la vérification, ou non, d'un effet attendu vis-à-vis d'un choix de conception antérieur, et donc à une **forme d'apprentissage de T*PACK**. Ainsi, le dialogue entre les hypothèses de conception et les retours offerts par leur réalisation on permis de construire de **nouvelles connaissances ancrées dans l'expérience.** Cela illustre les propos de Béguin (2013) concernant le fait qu'une hypothèse peut être validée, remise en mouvement ou rejetée, et créer ainsi de l'inattendu ou de la nouveauté, constituant ainsi pour l'émetteur une nouvelle source d'apprentissages. Un parallèle peut en effet être fait avec les travaux de Koehler & Mishra (2007) concernant le modèle TPACK sur les connaissances des enseignants. Ainsi, **l'élaboration de nouvelles pratiques d'enseignement** intégrant les tables interactives (**TPACK**) peut renvoyer à une forme **d'intégration des connaissances** sur les contenus à enseigner (**CK**), sur leurs pratiques pédagogiques habituelles (**PK**) et sur la nouvelle technologie (**T*K**).

3.2.4.2 Lien entre dimensions des choix de conception et les connaissances mobilisées

Sur l'ensemble de la conception (cf. Figure 60) la majorité des **choix de conception physiques** ont été justifiés par des connaissances de type **T*CK** et, dans une moindre mesure, CK, PCK et T*PACK. Les **choix de conception prescriptifs** se sont appuyés en particulier sur des **PCK** et des **T*PACK** et, dans une moindre mesure, sur des TPK, des T*PK et des T*CK.

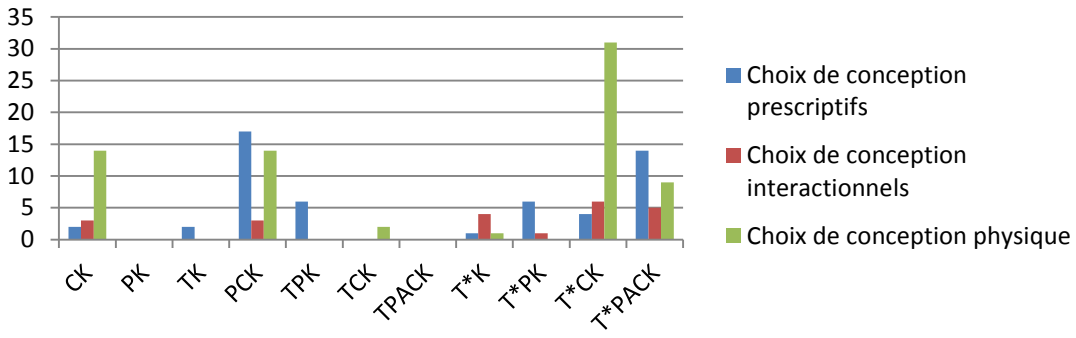


Figure 60. Types de connaissances mobilisées selon les dimensions des choix de conception

Ces résultats suggèrent que, lorsqu'ils formulent des choix de dimension **physique**, les concepteurs mobilisent majoritairement :

- des connaissances relatives aux possibilités offertes par les tables interactives pour représenter des informations **(T*CK)**
- des connaissances faisant référence à des choix de conception antérieurs de dimension physique également **(T*CK)**.

D'autre part, leurs choix de conception **prescriptifs** sont justifiés principalement par :

- des connaissances sur les représentations et la formulation des concepts physiques, sur les difficultés des élèves et leurs connaissances antérieures ou sur les techniques d'enseignement (**PCK**) ;
- des hypothèses antérieures, confrontées ou non, sur l'activité de l'enseignant ou des élèves médiatisée par le couple application tangible-scénarios pédagogiques (**T*PACK**).

Ainsi, le fait de **construire conjointement l'application tangible** (dimension physique) et les **scénarios pédagogiques** (dimension prescriptive) a conduit les participants à mobiliser des connaissances variées et **intégrant différents types de connaissances** (TK, CK & PK). Si

leur activité de conception n'avait porté que sur l'application, il probable que les PCK et les T*PACK auraient été moins mobilisé pour justifier les choix de conception. Dès lors, les formes d'apprentissage en conception se seraient limités aux T*CK et ne seraient pas allées jusqu'au T*PACK.

3.2.5 Liens entre apprentissages et processus d'intégration/innovation

À partir des effets des différentes méthodes sur les processus d'intégration/innovation et sur les apprentissages en conception, des liens peuvent être faits entre eux.

Les **apprentissages mutuels au début de la conception** ont pu favoriser les processus **d'innovation technologique**, **d'innovation dans les pratiques** et **d'intégration de l'application** tangible dans ces pratiques.

Les **apprentissages sur la technologie** résultants de la manipulation libre des objets intermédiaires basse et haute fidélité ont favorisé les **processus d'intégration** de l'application tangible dans les pratiques futures.

Les **apprentissages permettant d'articuler et d'intégrer** des **connaissances de différents types**, en particulier pédagogiques, grâce aux méthodes de simulation, ont favorisé les **processus d'innovation dans les pratiques** et **d'adaptation de celles-ci aux caractéristiques des tables interactives**

Les **apprentissages** concernant des connaissances int**égrant toutes les dimensions de l'activité d'enseignement,** résultants de la mise en œuvre en situation réelle des produits de la conception ont favorisé les **processus d'innovation dans les pratiques** et **d'intégration de l'application tangible** dans celles-ci.

4 Conclusion

Ce chapitre a présenté la méthode et les résultats de l'analyse longitudinale de l'activité de conception déployée dans le cadre du projet Tactileo. L'analyse des échanges entre concepteurs et des phases de la conception a permis de caractériser chaque phase de la conception par rapport aux méthodes que nous étudions, et de les lier aux processus d'intégration et d'innovation et aux apprentissages en conception.

Au regard de la problématique de ce travail de thèse, les résultats de ce chapitre permettent de répondre à trois de nos quatre questions de recherche.

Premièrement, ils ont montré en quoi les méthodes de conception ont permis d'articuler les processus d'intégration et d'innovation en mettant en avant les relations suivantes :

- La construction conjointe de l'application tangible et des scénarios pédagogiques, l'implication de participants, à la fois enseignants pionniers et co-concepteurs, la confrontation de leurs hypothèses de conception aux objets intermédiaires basse et haute fidélité et en situation réelle ainsi que l'analyse et la mobilisation de leurs besoins ont favorisé les processus d'intégration de l'application tangible aux pratiques enseignantes ;
- la reformulation des scénarios pédagogiques des enseignants pionniers et leurs mise à l'épreuve en simulation et en situation réelle ont favorisé les processus d'adaptation des pratiques enseignantes aux caractéristiques des tables interactives ;
- la définition des caractéristiques de l'application tangible par des enseignants pionniers en s'appuyant sur un démonstrateur tangible et sur la présentation du potentiel des tables interactive a favorisé les processus d'innovation technologique ;
- La construction conjointe de l'application tangible et des scénarios pédagogiques, l'implication d'enseignants pionniers, l'ensemble des formes de confrontation de leurs hypothèses de conception et l'analyse et la mobilisation de leurs besoins ont favorisé les processus d'innovation dans les pratiques enseignantes.

De plus, les résultats ont mis en avant des caractéristiques méthodologiques permettant d'engager des apprentissages chez les concepteurs :

- L'analyse des besoins et la prospection sur les usages des tables interactives ont participé aux apprentissages des enseignants pionniers concernant le potentiel de ces technologies et leur intérêt par rapport aux activités d'enseignement et d'apprentissage dans l'étape initiale de construction d'un référentiel commun avec le démonstrateur ;
- Les interactions avec les objets intermédiaires basse et haute fidélité par les enseignants co-concepteurs lors de la définition des caractéristiques de l'application tangible leur ont permis d'acquérir des connaissances sur ses modalités potentielles de représentation des contenus à enseigner ;
- Les modalités de confrontation plus élaborées, par la simulation et la mise en situation réelle, des hypothèses de conception des enseignants pionniers relatives à la fois aux

fonctions constituantes de l'application tangible et aux modes opératoires prévus dans les scénarios pédagogiques ont favorisé l'articulation de leurs différents types de connaissances ;

Enfin, les résultats ont montré des liens potentiels entre ces apprentissages et les processus d'intégration/innovation :

- Les premiers apprentissages mutuels concernant le potentiel de la technologie et les besoins des participants ont favorisé les processus d'innovation technologique, d'innovation dans les pratiques et d'intégration des tables interactives dans ces pratiques ;
- Les apprentissages relatifs aux modalités de représentation des contenus à enseigner ont favorisé les processus d'intégration de la technologie aux pratiques enseignantes ;
- Les apprentissages permettant l'intégration des différents types de connaissances des enseignants ont favorisé les processus d'intégration des tables interactives dans les pratiques enseignantes, d'adaptation de ces pratiques aux caractéristiques des tables interactives et d'innovation dans ces pratiques.

Chapitre 9 DISCUSSION GENERALE ET CONCLUSION

Notre discussion porte dans un premier temps sur les réponses apportées aux questions de recherche au regard d'éléments théoriques présentés dans les premiers chapitres de ce manuscrit. En perspectives, des recommandations pour la conception de TICE sur technologie émergente sont proposées. Nos choix d'analyse et le rôle des participants sont ensuite discutés. Enfin, l'impact des tables interactives et des objets tangibles sur l'activité de conception de TICE est présenté.

1 Discussion des réponses apportées aux questions de recherches

1.1 En quoi les solutions de conception rendent-elles compte de processus d'intégration et d'innovation ?

Nous avons montré dans le chapitre 7 que les produits de la conception résultaient des quatre types de processus d'intégration/innovation. Les analyses se sont pour cela appuyées sur les résultats des chapitres 5 et 6 sur les caractéristiques et les usages potentiellement intéressants des tables interactives pour l'enseignement d'une part, et les besoins des participants d'autre part. En détaillant les caractéristiques du couple *application tangible – scénarios pédagogiques* finaux, nous avons ainsi pu discuter de leur caractère adapté et de leur plus-value par rapport aux besoins ainsi que de l'exploitation du potentiel technologique des tables interactives. Les résultats ont cependant montré que certaines de ces caractéristiques ne faisaient pas référence aux résultats du cadrage du champ des possibles relevés dans les chapitres 5 et 6. C'est par exemple le cas des évaluations en classe avec l'application tangible. Ces caractéristiques résultaient cependant bien de processus d'intégration/innovation, mais ont émergé au cours de la conception en accord avec le paradoxe de l'ergonomie de conception comme défini par Theureau & Pinsky (1984).

Nos résultats concernant le caractère intégré et innovant des produits de la conception sont cependant à nuancer, car ils se basent sur les besoins initiaux des enseignants. Il ne s'agit en aucun cas d'une évaluation de ces deux dimensions au regard des activités d'enseignement et d'apprentissage médiatisées par ces produits. Dans le cadre du projet, une telle évaluation a été réalisée, mais elle s'est déroulée après la fin du recueil de données de ce travail de thèse. Elle tendrait à montrer que les pratiques étaient encore en train d'évoluer et que l'enseignant se donnait le droit d'explorer de nouvelles fonctions. De tels résultats auraient probablement pu répondre de façon plus riche et plus précise à notre question de recherche. Néanmoins, les expérimentations en classes réalisées ont constitué une forme d'évaluation qui justifie selon nous notre réponse.

1.2 Dans quelle mesure les méthodes utilisées en conception favorisent-elles les processus d'intégration et d'innovation ?

Les résultats du chapitre 8 ont mis avant des liens entre les méthodes de conception et les processus d'intégration/innovation. Les processus d'adaptation des pratiques enseignantes aux caractéristiques des tables interactives ou d'innovation technologique ont été engagés par des caractéristiques méthodologiques relativement distinctes, respectivement :

- la reformulation des scénarios pédagogiques des enseignants pionniers et leurs mises à l'épreuve en simulation et en situation réelle ;
- la définition des caractéristiques de l'application tangible par des enseignants pionniers en s'appuyant sur un démonstrateur tangible et sur la présentation du potentiel des tables interactive.

En revanche, les processus d'intégration de l'application tangible dans les pratiques enseignantes et d'innovation dans celles-ci ont tous les deux été engagés par les caractéristiques méthodologiques suivantes :

- La construction conjointe de l'application tangible et des scénarios pédagogiques, l'implication d'enseignants pionniers, la confrontation de leurs hypothèses de conception aux objets intermédiaires basse et haute-fidélité et en situation réelle, ainsi que l'analyse et la mobilisation de leurs besoins

En termes de différences méthodologiques, le rôle de co-concepteur est exclusivement lié à l'intégration de l'application tangible dans les pratiques, alors que les techniques de simulation ont impacté le processus d'innovation dans ces pratiques. Les similarités

constatées illustrent selon nous le lien fort qui unit ces processus dans une démarche de conception anthropocentrée, qui peut être vue comme un processus cyclique de recherche d'usages et de solution technique (Béguin & Rabardel, 2000). Nous avons en effet constaté de nombreuses interactions entre eux dans nos résultats.

D'une part un processus d'intégration peut conduire à un processus d'innovation. En effet, pour reprendre les propos de Daniellou, « *les décisions de conception ouvrent et ferment des pans entiers de l'activité future et certaines formes d'activité seront possibles d'autres, empêchées* » (Daniellou, 2007, p. 80). D'autre part, dans la mesure où un processus d'innovation porte sur de nouvelles formes d'activités, il peut nécessiter de les caractériser en vue de les intégrer aux formes d'activités existantes. La conception peut alors être vue comme un processus cyclique d'anticipation d'usage et de recherche de solutions techniques (Béguin & Rabardel, 2000). Il a d'ailleurs été constaté que l'avancement des développements de l'application tangible a offert des marges croissantes d'exploration de ses usages possibles. Cela va dans le sens de nos conclusions sur l'impact du prototype et de sa mise en œuvre en situation réelle sur les apprentissages des participants qui ont alors pu rebondir sur de nouveaux usages.

1.3 En quoi les méthodes de conception permettent-elles d'engager des apprentissages chez les enseignants concepteurs ?

Cette question place une partie de nos travaux dans le prolongement de ceux de Burkhardt (2010) en ce qu'il proposait d'étudier les apprentissages tout au long d'un processus de conception et les facteurs qui peuvent les influencer. Le chapitre 6 représente à ce titre un diagnostic des connaissances préexistantes des enseignants impliqués par le prisme de leurs besoins. De là, le chapitre 8 a montré que les participants impliqués avaient pu développer des connaissances de plus en plus intégrées grâce aux méthodes de conception utilisées. En résumé, celles-ci leur ont permis d'articuler dans un premier temps leurs connaissances préexistantes en didactique avec de nouvelles connaissances sur les tables interactives. Ils ont ainsi pu se construire des représentations sur leurs usages possibles et les modalités qu'elles offraient pour représenter les contenus à enseigner. Les modalités de confrontations de leurs hypothèses en simulation et en situation réelle leur ont ensuite permis d'articuler ces connaissances didactiques liées à la technologie avec des connaissances pédagogiques.

En conception sur technologie émergente pour l'enseignement, ces résultats sont intéressants compte tenu des obstacles actuels à l'introduction des TICE, tels que la formation des

enseignants (Artigues, 2013 ; Bétrancourt, 2007 ; Joab & al., 2003 ; Pettenati & al., 2001). Les activités de conception de TICE peuvent en effet être vues comme des opportunités de formation des enseignants (Brown & Campione, 1996). Un autre obstacle à l'intégration des TICE relève du fait que les TICE sont conçues au regard de l'activité des élèves ou des objectifs d'apprentissage, mais sans prendre en compte l'activité des enseignants qui sont responsables de l'avancée du temps didactique. En ce sens, le choix de faire participer les enseignants au processus de conception permet sans doute de lever une partie des obstacles qui entravent l'intégration des TICE en classe en permettant de s'appuyer sur leur activité et d'autre part de créer les conditions de développement de leurs pratiques pédagogiques nécessaire à cette intégration.

Au regard de l'activité des concepteurs et de leurs hypothèses de conception, un parallèle avec l'activité d'apprentissage des élèves en classe peut d'ailleurs être fait. Les enseignants de physique-chimie attendent en effet des élèves qu'ils formulent des hypothèses, établissent un protocole expérimental et réalisent des observations qui confirment, ou non leurs hypothèses. Cette démarche d'investigation, médiatisée par l'enseignant, est censée favoriser l'apprentissage de la physique et l'interprétation d'une expérience réelle à l'aide de modèles physiques. En conception, les participants formulent également des hypothèses de conception et les scénarios pédagogiques pourraient être vus comme des protocoles. La confrontation des objets intermédiaires et, surtout, la mise en œuvre en situation réelle constitueraient alors une expérience dont les observations seraient source d'apprentissages pour les enseignants, et plus largement pour les participants de la conception.

Deux limites de cette analogie concernent d'une part le rôle médiateur qui en conception serait partagé entre les concepteurs, ergonomes inclus et d'autre part le type d'apprentissage engendré par ces activités. En reprenant les métaphores de Sfard (1998), les apprentissages ne se font plus par l'acquisition, mais par la participation. Cette dernière transparaissait particulièrement lorsqu'ils formulaient collectivement des hypothèses de conception et dans le caractère implicite de certaines justifications ou de certains effets attendus de choix de conception. La construction d'un référentiel commun initial, poursuivie au fil de la conception, a ainsi favorisé une compréhension mutuelle (Cviko & al., 2013) du problème de conception entre les concepteurs. Cela suggère que leurs représentations sur les artefacts à concevoir, sur l'objet de l'activité de conception ou sur les besoins des futurs utilisateurs étaient suffisamment proches pour collaborer à un niveau parfois implicite. Par ailleurs, au niveau des apprentissages, alors que ceux des élèves sont définis préalablement à la situation

en classe au travers des programmes ou des objectifs d'acquisition que se fixe l'enseignant, ceux des participants émergent au contraire dans le cadre de la situation de conception. Ils ne sont pas visés en tant que tel, ni ne peuvent être prédéfinis, mais procède du déroulement du processus de conception.

1.4 En quoi les apprentissages influent-ils sur les processus d'intégration et d'innovation ?

De articulations entre les apprentissages et les processus d'intégration ont été inférées à partir des résultats du chapitre 8 :

- Les premiers apprentissages mutuels concernant le potentiel de la technologie et les besoins des participants ont favorisé les processus d'innovation technologique, d'innovation dans les pratiques et d'intégration des tables interactives dans ces pratiques ;
- Les apprentissages relatifs aux modalités de représentation des contenus à enseigner ont favorisé les processus d'intégration de la technologie aux pratiques enseignantes ;
- Les apprentissages permettant l'intégration des différents types de connaissances des enseignants ont favorisé les processus d'intégration et d'innovation dans les pratiques enseignantes.

Des analyses plus approfondies seraient ici certainement nécessaires. Il aurait fallu déployer des techniques différentes, par exemple des auto-confrontations (Mollo & Falzon, 2004) ou des entretiens d'explicitations (Vermersch, 2006), pour accéder plus en profondeur aux connaissances des participants et distinguer celles qui préexistaient à l'activité de conception de celles qui y ont été construites. Dès lors, les données recueillies ne se limiteraient pas à des traces productives, mais aborderaient également la dimension constructive de l'activité des concepteurs (Samurçay & Rabardel, 2004).

2 Perspectives

2.1 Recommandations pour la conception de TICE sur technologie émergente

2.1.1 Construire conjointement le système technique et les pratiques enseignantes

Les travaux présentés dans ce document soutiennent l'intérêt des approches de conception anthropocentrées visant la conception d'un artefact et de l'activité future de ses utilisateurs (Bannon & Bodker, 1989 ; Béguin, 2013 ; Kaptelinin & Nardi, 2006). La reformulation des scénarios pédagogiques renvoie à cette activité future des enseignants et des élèves. En faisant un parallèle avec les cercles d'interaction de Dillenbourg & Evans (2011), la construction conjointe des scénarios et de l'application tangible a en effet permis aux concepteurs de travailler sur plusieurs niveaux. Leurs hypothèses de conception ont en effet concerné les interactions utilisateur / application tangible, l'activité en groupe des élèves autour de la table interactive et *l'orchestration de la classe* par l'enseignant (Dillenbourg & Jermann, 2010).

À ce titre, un tiers des choix de conception ont renvoyé aux scénarios pédagogiques, ce qui montre que la prescription de l'activité future de l'enseignant a requis de nombreuses modifications. Ce résultat est intéressant pour la conception de TICE, car il appuie les études existantes sur les limites de l'élaboration de ressources numériques génériques pour l'enseignant, indépendamment de sa pratique (Lombard, 2007). De plus, les résultats suggèrent que les scénarios existants ont favorisé les raisonnements par analogie en ancrant les modes opératoires prévus dans des pratiques connues et éprouvées par les participants. Ils ont ainsi permis de réduire la complexité du problème de conception en focalisant l'activité des concepteurs sur les besoins des enseignants pionniers. Cependant, ils ont également pu limiter l'ampleur des innovations possibles dans l'activité future avec les produits de la conception. En effet, dans le chapitre 5, les propositions d'usages des tables interactives étaient plus diversifiées (p. ex. serious game, expérimentation augmentée, tâches avec des rôles spécifiques pour chaque élève, préparation collective d'une présentation ou d'un poster, etc.), mais peut-être trop pour ces technologies à l'heure actuelle. C'est pourquoi, pour la majorité des hypothèses de conception, les transformations de l'activité prévues pourraient être qualifiées « d'incrémentales », dans le sens qu'elles ne représentent pas une rupture avec

les pratiques habituelles. C'est par exemple le cas de l'introduction d'un niveau intermédiaire de modélisation. Cependant, pour les participants, ces transformations constituent déjà une forme de développement potentiellement importante de leur activité compte tenu de leurs besoins.

À la lumière de ces résultats, la construction conjointe de l'artefact et des usages apparaît non seulement utile, mais également nécessaire. Elle permettrait de favoriser l'innovation dans les pratiques enseignantes et l'adaptation mutuelle entre un système technique et ces pratiques.

2.1.2 Favoriser l'implication d'enseignants et la confrontation de leurs hypothèses

L'implication d'enseignants co-concepteurs et d'un prototype apparaît importants pour des technologies offrant un large choix pour ces représentations, comme dans les interfaces tangibles. Dans notre cas, la phase de confrontation au prototype a en effet donné lieu à plus de 40 % de tous les choix de conception des dimensions physiques et interactionnelles. Cela montre l'importance d'introduire ce type d'objet intermédiaire « haute-fidélité » tôt dans la démarche pour favoriser l'avancement de la conception. À notre sens, ce résultat pourrait être généralisé à la conception d'applications tangibles dans d'autres situations de travail pour lesquelles la représentation de l'information a une importance, notamment d'autres situations d'enseignement de disciplines scientifiques.

De plus, l'articulation entre la redéfinition de prescriptions existantes et leur mise en œuvre en situation réelle par des enseignants pionniers pourrait bénéficier à d'autres démarches de conception de TICE pour favoriser les processus d'innovation. Par ailleurs, leur intégration passe par un travail sur leur articulation avec les contraintes spatiales et matérielles propres à chaque enseignant pionnier, par exemple grâce à des techniques de simulation avec de futurs utilisateurs.

2.2 Limites du traitement de traces productives

En reprenant la typologie des échanges en conception pour l'enseignement de Walker (1971), les données recueillies portaient principalement sur les échanges de type brainstorming et problème dans la mesure où les analyses étaient centrées sur les hypothèses de conception. Le premier type correspond à la génération d'idées dans laquelle il y a beaucoup d'interactions entre les enseignants et les décisions sont prises intuitivement et le second renvoie à la

définition d'un problème, son cadrage et l'élaboration collective et argumentée d'une solution.

Walker (1971) décrit cependant deux autres catégories d'échanges : les explications, lorsqu'une personne présente et explique une notion ou lorsqu'elle éclaire le groupe sur un sujet dont elle est experte, et le REX, lorsqu'un enseignant a recours à un exemple concret de situation d'enseignement réelle. Ces deux dernières catégories présentent de fortes similarités avec notre définition du cadrage du champ des possibles de l'activité de conception. Cependant, si ces catégories d'échanges en conception apparaissent effectivement au cours de la conception, elles n'apparaissent cependant pas aussi centrales que les échanges de type brainstorming et problème.

Une orientation différente dans le recueil des données, incluant davantage d'échanges, aurait pu rendre compte plus précisément des effets de l'identification des besoins et de leur mobilisation par les concepteurs, ainsi que des explications sur la technologie émergente. Cela aurait cependant représenté une masse de données considérable, qui aurait demandé des traitements différents.

2.3 Bilan et perspectives sur les acteurs de la conception

2.3.1 Impact des spécificités des participants impliqués

Au regard de la littérature sur l'analyse des besoins en conception (Anastassova, 2006 ; Loup-Escande, 2010) nous nous attendions à un effet plus prononcé de la mobilisation par les ergonomes des besoins des participants identifiés dans le chapitre 6. Ce constat peut être discuté par rapport au profil des participants impliqués. Il ne s'agissait pas d'enseignants « lambda », mais d'experts en conception de ressources pédagogiques destinées à la communauté enseignante. Leurs méthodes de conception impliquaient habituellement de rédiger des scénarios pédagogiques et d'en tester les résultats dans leurs classes comme nous l'avons fait, similairement aux approches de type Design-Based Research (Brown, 1992 ; Collins, 1990).

Les participants, tant les enseignants de physique que l'enseignante-chercheure en didactique, avaient donc déjà réalisé un travail d'explicitation de leurs besoins en amont de notre démarche de conception. Cette particularité, évoquée dans les chapitres 6 et 7, a d'ailleurs pu faciliter l'analyse des besoins. Elle a également impacté le rôle des ergonomes dans la mesure où, malgré leur analyse de la tâche, leurs observations et les entretiens réalisés auprès d'autres

enseignants, ils ont rarement eu à réinjecter les besoins identifiés. Les participants avaient en effet un recul et une expertise en conception suffisants pour invoquer divers aspects de l'activité d'enseignement afin de « cadrer » l'activité de conception.

2.3.2 Rôle des ergonomes dans la démarche

Les ergonomes ont joué plusieurs rôles importants dans l'activité de conception. Ils ont notamment aidé les futurs utilisateurs en proposant des outils leur permettant de faire le lien entre leurs pratiques professionnelles existantes et leurs futures pratiques avec le produit de la conception. En effet, en reprenant les travaux de Darses & Reuzeau (2004), ils ont participé à l'outillage méthodologique des concepteurs de plusieurs façons. Les différents objets intermédiaires qu'ils ont fournis ont constitué des supports de communication partagée permettant les échanges de savoirs entre les acteurs, afin de favoriser les apprentissages croisés (Hatchuel, 1994) et de faire évoluer les compétences collectives. Ces objets intermédiaires et leurs mises en œuvre par les ergonomes ont permis de générer des représentations de ces connaissances qui soient compatibles avec celles de l'ensemble des acteurs. Ils ont facilité l'expression des connaissances non contrainte pour rendre compte de l'activité des utilisateurs lors de l'étude prospective du chapitre 5 et au cours des réunions de conception. En pratique, cela s'est traduit par l'utilisation d'outils d'analyse des problèmes (p. ex. séances de créativité, allo confrontation collective), d'outils d'aide à la simulation de situations futures (p. ex. maquettes, prototypes, scénarios). À ce titre, un des outils de maquettage haute fidélité d'interface tangible représenteraient un apport considérable pour les ergonomes pour produire des solutions alternatives sans l'aide d'un développeur. En outre, les processus d'innovation technologique ont principalement été engagés par les ergonomes, ce qui souligne la pertinence et la légitimité de l'ergonome en conception avec de nouvelles technologies.

2.3.3 Perspectives sur l'implication d'élèves en conception

Les caractéristiques et les rôles des enseignants impliqués dans notre démarche de conception participative ont été abordés en profondeur dans cette étude. Cependant, les élèves représentent également des utilisateurs finaux des résultats de cette démarche. S'ils ont été pris en compte par l'intermédiaire de l'enseignante-chercheure en didactique également impliquée en conception, leur implication directe en conception pourrait être défendue.

En premier lieu, la dimension constructive des activités de conception présente un intérêt pour placer des élèves en situation de conception, comme opportunité d'apprentissage. Harel & Papert (1980) ont illustré cela en demandant à des élèves de concevoir une application avec le langage de programmation Logo pour l'apprentissage des fractions en mathématiques. Leurs résultats ont montré que les élèves-concepteurs maîtrisaient mieux les fractions et le langage Logo et qu'ils avaient acquis davantage de compétences métacognitives que les élèves de classes contrôle.

Par ailleurs, malgré les limites que nous avons évoquées concernant le manque de recul des élèves sur les objectifs d'apprentissage des enseignants, leur implication aurait pu favoriser l'avancement productif de la conception. De façon similaire aux travaux de Decortis (2013) sur l'analyse des schèmes d'enfants dans des activités créatives instrumentées, il aurait été intéressant d'étudier les schèmes d'élèves avec les objets tangibles. Bien qu'elles ne soient pas présentées dans ce document, les données vidéo recueillies lors des expérimentations en classes ont mis en lumière des manipulations inattendues, voire des détournements, de ces objets tangibles qui mériteraient d'être étudiés. En outre, solliciter quelques élèves en réunion de conception auraient sans doute permis d'affiner les métaphores choisies par les concepteurs pour les adapter à la compréhension des élèves, par exemple en termes d'affordance (Gibson, 1977). Par analogie avec notre problématique, cela renverrait à un processus d'intégration des objets tangibles dans des pratiques d'apprentissage. Toutefois, la spécificité de ces activités d'apprentissage dans le champ scolaire les rend fortement dépendantes de l'activité d'enseignement. Ainsi, il nous est apparu nécessaire d'intégrer les enseignants dans la conception, bien que ceux-ci ne puissent être considérés comme les seuls utilisateurs finaux des technologies.

2.4 Perspectives concernant les tables interactives et les objets tangibles

2.4.1 Impact des technologies émergentes sur l'activité des élèves

Dès le début de la conception, les tables interactives ont été considérées comme des supports potentiels à l'activité collaborative entre les élèves. La simulation d'expériences devait donner lieu à des échanges entre élèves et avec l'enseignant pour favoriser l'apprentissage de modèles physiques. Paradoxalement, cette activité collaborative a été peu spécifiée dans les scénarios pédagogiques des enseignants ou dans les tâches d'apprentissage des élèves. Certes l'enseignant médiatisait ponctuellement cette activité lors des expérimentations en classes,

mais le plus souvent, les groupes d'élèves étaient en autonomie. Il y avait alors plus ou moins de collaboration selon les groupes. Par conséquent, les tâches collectives auraient selon nous gagné à être spécifiées davantage afin de favoriser les interactions entre élèves autour d'une même table interactive. Il aurait par exemple été possible de leur attribuer des rôles associés à des objets tangibles nécessitant qu'ils se coordonnent pour atteindre un objectif donné. Plus globalement, cela souligne à notre sens l'intérêt des tables interactives et des objets tangibles pour des activités d'enseignement et d'apprentissage (Knibbe & al., 2015a), mais des travaux supplémentaires sont nécessaires pour développer des usages collaboratifs innovants et adaptés à ces activités.

2.4.2 Impact des objets tangibles sur l'activité des concepteurs

Par ailleurs, l'évolution des objets tangible rend compte de la recherche d'un fort *degré de tangibilité* (Fishkin, 2004) dans notre activité de conception. D'une part, la *personnification*, correspondant au couplage entre un objet tangible et son image associée, était importante dans la mesure où les images étaient généralement affichées sous les objets tangibles. Néanmoins, les résultats du chapitre 8 ont montré que peu de choix de conception avaient fait référence à la dimension interactionnelle. Selon nous, la nature directe (Hutchins & al., 1985) des interactions tangibles a pu faciliter l'élaboration des modalités de manipulation des objets tangibles. D'autre part les *métaphores* choisies rendaient compte d'une forte analogie entre l'action d'un utilisateur et l'action qu'aurait cette même action dans le monde réel, c'est à dire dans des manipulations expérimentales en optique. Ce résultat renvoie à nos propos précédents sur l'intérêt des objets tangibles pour l'enseignement de disciplines scientifiques, pour faire de la simulation, ou plus largement de disciplines dans lesquelles la représentation de l'information joue un rôle important. Les objets tangibles proposent pour cela un large éventail (cf. le continuum de cohérence de Koleva & al., 2003), qui peut cependant nécessiter de nombreuses itérations en conception.

3 Conclusion

Pour conclure, les études réalisées dans le cadre de ce travail de thèse ont mis en avant des caractéristiques méthodologiques en conception de TICE qui jouent sur les processus d'adaptation d'un artefact technique aux pratiques d'enseignement, d'adaptation de ces

pratiques aux caractéristiques d'une technologie émergente et d'innovation d'un point de vue technique et dans ces pratiques. Des effets de ces caractéristiques méthodologiques sur les apprentissages en conception ont également été étudiés et ont mis en avant une séquence de développement des connaissances des concepteurs. Les résultats suggèrent des liens entre ces apprentissages, correspondant à la dimension constructive de l'activité de conception et les processus d'intégration et d'innovation, qui renvoient aux objectifs productifs de cette activité. À ce titre, ce travail de thèse ouvre des perspectives pour des recherches futures sur les articulations entre ces trois processus d'intégration, d'innovation et d'apprentissage en conception qui doivent être approfondies.

Bibliographie

Aldon, G., Arzarello, F., Cusi, A., Garuti, R., Martignone, F., Robutti, O., & Soury-Lavergne, S. (2013). The meta-didactical transposition: a model for analyzing teachers education programs. *Mathematics learning across the life span*, *1*, 97-124.

Alluin, F. (2010). Les technologies de l'information et de la communication (TIC) en classe au collège et au lycée : éléments d'usages et enjeux. *Les dossiers évaluations et statistiques*, 197, 83 p. En ligne : http://media.education.gouv.fr/file/197/18/9/Dossier197_158189.pdf.

Anastassova, M. (2006). *L'analyse ergonomique des besoins en amont de la conception de technologies émergente : le cas de la Réalité Augmentée pour la formation à la maintenance automobile.* Thèse, Université Paris 5, Paris.

Angeli, C., & Valanides, N. (2005). Preservice teachers as ICT designers: An instructional design model based on an expanded view of pedagogical content knowledge. *Journal of Computer-Assisted Learning*, *21*(4), 292-302.

Artigues, M. (1998). Teacher Training as a key issue for the integration of Computer Technologies. In Tinsley D. & Johnson D.C. (Eds), *Information and Communication Technologies in School Mathematics,* (pp. 121-130). London : Chapman & Hall.

Artigue, M. (2013). L'impact curriculaire des technologies sur l'éducation mathématique. *Cuadernos de Investigación y Formación en Educación Matemática*, *11*, 295-305.

Assude, T., & Emprin, F. (2013). Repenser la formation aux TICE : dialectique entre recherché et formation. In J.-G. Lagrange (Ed.). *Les technologies numériques pour l'enseignement : usages, dispositifs et genèses* (pp.145-162). Toulouse, France : Octares.

Bannon, L. J., & Bødker, S. (1989). Beyond the interface: Encountering artifacts in use. *DAIMI Report Series*, *18*, 288-320.

Barcellini, F. (2015). *Développer des Interventions Capacitantes en Conduites du Changement : Comprendre le travail collectif de conception, agir sur la conception collective du travail*. Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Bordeaux.

Barcellini, F., Van Belleghem, L., & Daniellou, F. (2013). Les projets de conception comme opportunité de développement des activités. In P. Falzon (Ed.), *Ergonomie constructive* (pp. 191-206), Paris : PUF.

Baron, G.-L. (1994). *L'informatique et ses usagers dans l'éducation*. Note de synthèse pour l'habilitation à diriger des recherches, Université Paris 5 - René Descartes, Paris.

Baron, G.-L., & Bruillard, É. (2008). Technologies de l'information et de la communication et indigènes numériques : quelle situation ?. *Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Éducation et la Formation (STICEF)*, *15*, 12 p.

Bécu-Robinault, K. (2007). Connaissances mobilisées pour préparer un cours de sciences physiques. *Aster. 45*, 165-188.

Béguin, P. (2003). Design as a mutual learning process between users and designers. *Interacting with computers*, *15*(5), 709-730.

Béguin, P. (2004). L'ergonome, acteur de la conception. In P. Falzon (Ed.), *Ergonomie*. Paris : PUF.

Béguin, P. (2007). Prendre en compte l'activité de travail pour concevoir. *Activités*, *4* (2), 107-114.

Béguin, P. (2013). La conception des instruments comme processus dialogique d'apprentissages mutuels. In P. Falzon (Ed.), *Ergonomie constructive* (pp. 147-160), Paris : PUF.

Béguin, P. & Rabardel, P. (2000). Concevoir pour les activités instrumentées. *Revue d'Intelligence Artificielle*, *14*, 35-54.

Benko, H., Morris, M. R., Brush, A. B., & Wilson, A. D. (2009). *Insights on interactive tabletops: A survey of researchers and developers*. research.microsoft.com.

Bernard, F. X., Ailincai, R., & Baur, D. (2010). Les technologies de l'information et de la communication : de l'introduction de l'informatique à l'École aux pratiques actuelles des jeunes. *Pratiques éducatives dans un contexte multiculturel. L'exemple plurilingue de la Guyane. Le secondaire*, 45-55.

Bétrancourt, M. (2007). Pour des usages des TIC au service de l'apprentissage. In Gérard Puimatto (Ed) *TICE : L'usage en travaux, Numéro Hors-série des Dossiers de l'ingénierie éducative* (pp. 127 - 137). Paris : CRDP.

Bjerknes, G., & Bratteteig, T. (1995). User participation and democracy: A discussion of Scandinavian research on system development. *Scandinavian Journal of information systems*, *7*(1), 1.

Bonnardel, N. (2006). *Créativité et conception, approches cognitives et ergonomiques*. Groupe de Boeck.

Boschman, F., McKenney, S., & Voogt, J. (2014). Understanding decision making in teachers' curriculum design approaches. *Educational Technology Research and Development*, *62*(4), 393-416.

Bourmaud, G. (2006). *Les systèmes d'instruments : Méthodes d'analyse et perspectives de conception.* Thèse, Université Paris 8.

Brangier, E., & Robert, J. M. (2014). L'ergonomie prospective : fondements et enjeux. *Le travail humain*, *77* (1), 1-20.

Brousseau, G., & Centeno, J. (1991). Rôle de la mémoire didactique de l'enseignant. *Recherches en didactique des mathématiques*, *11* (2.3), 167-210.

Brown, A. L. (1992). Design experiments :Theroretical and methodological challenges in creating complex interventions in classroom settings. *The journal of the Learning Sciences, 2*(2), 141-178.

Brown, A. L., & Campione, J. C. (1996). Guilded discovery in a community of learners. In K. McGilly (Ed.), *Classroom lessons: Integrating cognitive theory and classroom practice* (pp. 229-270). Cambridge: MIT Press/Bradford Books.

Bruillard, E. (2011). Le déploiement des ENT dans l'enseignement secondaire : entre acteurs multibles, dénis et illusions. *Revue française de pédagogie, 177*, 101-130.

Buisine, S., Besacier, G., Najm, M., Aoussat, A., & Vernier, F. (2007). Computer- supported creativity: Evaluation of a tabletop mind-map application. *HCII'07 Human Computer Interaction International*. Lecture Notes in Computer Science (pp. 22–31). Springer.

Buisine, S., Besacier, G., Aoussat, A., & Vernier, F. (2012). How do interactive tabletop systems influence collaboration?. *Computers in Human Behavior*, *28*(1), 49-59.

Burkhardt, J. M. (2010). *Conception, utilisation et formation : trois perspectives sur l'apprentissage en ergonomie des technologies émergentes*. Habilitation à diriger des recherches*, Université de Provence*.

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. & Sperandio, J.-C. (2004). Ergonomie et conception informatique. In P. Falzon (Ed.), *Ergonomie* (pp. 437-450). Paris : Presses Universitaires de France.

Caelen, J. (2004). La conception participative d'objets interactifs : principes, méthodes et instrumentalisation. Présenté à *l'École Thématique du GDR « Cognition et TIC »,* Carry le Rouet, France.

Carroll, J. M. (2000). Five reasons for scenario-based design. *Interacting with computers*, *13*(1), 43-60.

Chaboissier, J. (2011). *Interactions simultanées de plusieurs utilisateurs avec une table interactive*. Thèse, Université Paris Sud-Paris XI.

Chambon, A. M., & Le Berre, S. (2011). *Enquête PROFETIC auprès de 5 000 enseignants du second degré.* Ministère de l'Éducation nationale de la jeunesse et de la vie associative.

Chapanis, A. (1996). *Human Factors in systems engineering.* New York : Wiley Interscience.

Cisel, M. & Bruillard, É. (2012). Chronique des MOOC. *Revue SITCEF*, *19*.

Chevallard, Y. (1985). *La transposition didactique.* Grenoble : La pensée Sauvage

Chevallard, Y. (1997). Les savoirs enseignés et leurs formes scolaires de transmission : un point de vue didactique. *Skholê*, *7*, 45-64.

Collins, A. (1990). *Toward a design science of education* (CTE Technical Report No. 1). New York : Center for Children and Technology, Education Development Center, Inc. Retrieved November 6, 2016, from http://www.edc.org/CCT/ccthome/reports/tr1.html

Couix, S. (2012). *L'ergonomie co-concepteur : quelle contribution à l'analyse des besoins à la conception de systèmes informatiques industriels ?* Thèse, Conservatoire national des arts et métiers, Paris.

Cuendet, S., Jermann, P., & Dillenbourg, P. (2012, September). Tangible interfaces: when physical-virtual coupling may be detrimental to learning. In *Proceedings of the 26th Annual BCS Interaction Specialist Group Conference on People and Computers* (pp. 49-58). British Computer Society.

Cviko, A., McKenney, S., & Voogt, J. (2013). The teacher as re-designer of technology integrated activities for an early literacy curriculum. *Journal of educational computing research*, *48*(4), 447-468.

Damodaran, L. (1996). User involvement in the systems design process-a practical guide for users. *Behaviour & information technology*, *15*(6), 363-377.

Daniellou, F. (2004). L'ergonomie dans la conduite de projets de conception de systèmes de travail. In P. Falzon (Ed.), *Ergonomie*. Paris : PUF.

Daniellou, F. (2007). Des fonctions de la simulation des situations de travail en ergonomie. *Activités Revue Électronique*, *4* (2).

Daniellou, F., Le Gal, S., & Promé, M. (2014). Organisational simulation: anticipating the ability of an organisation to cope with daily operations and incidents. In *Nordic Ergonomics Society Annual Conf* (pp. 781-785).

Daniellou, F., Naël, M. (1995). *Ergonomie*. In Traité de Génie industriel. Paris : Techniques de l'ingénieur.

Darses, F., & de Montmollin, M. (2006). *L'ergonomie*. Ed. La Découverte.

Darses, F., Détienne, F. & Visser, W. (2004) Les activités de conception et leur assistance. In P. Falzon (Ed.) *Ergonomie*. Paris : PUF.

Darses, F. & Falzon, P. (1996). La conception collective : une approche de l'ergonomie cognitive. In G. de Terssac & E. Friedberg (Eds). *Coopération et Conception*. Toulouse : Octares.

Darses, F. & Reuzeau, F. (2004) Participation des utilisateurs à la conception des systèmes et dispositifs de travail. In P. Falzon (Ed.), *Ergonomie*. Paris : PUF.

Darses, F. (2009). Résolution collective des problèmes de conception. *Le travail humain*, *72* (1), 43-59.

De Vries, E. (2001). Les logiciels d'apprentissage : panoplie ou éventail ?. *Revue française de pédagogie*, *137*, 105-116.

Decortis, F. (2013). L'activité narrative dans ses dimensions multi instrumentée et créative en situation pédagogique. *Activités*, *10* (1), 3-30.

Decortis, F. (2015). *L'ergonomie orientée enfant, concevoir pour le développement*. Paris : Presses Universitaires de France.

Dillenbourg, P., & Evans, M. (2011). Interactive tabletops in education. *International Journal of Computer-Supported Collaborative Learning*, *6*(4), 491-514.

Dillenbourg, P., & Jermann, P. (2010). Technology for classroom orchestration. In M. S. Khine & I. M. Saleh (Eds.), New science of learning: Cognition, computers and collaboration in education (pp. 525–552). Dordrecht: Springer.

Durand, M. (1996). *L'enseignement en milieu scolaire*. Paris : PUF.

Ehn, P., (1988). *Work-Oriented Design of Computer Artifacts*. Stockholm : Arbetslivscentrum.

Elliott, C., Livengood, K. & McGlamery, M. (2012). Teaching with technology: iPad use in the classroom. In P. Resta (Ed.), *Proceedings of Society for Information Technology & Teacher Education International Conference 2012* (pp. 4084-4086).

Esteves, A., van den Hoven, E., & Oakley, I. (2013). Physical games or digital games?: comparing support for mental projection in tangible and virtual representations of a problem-solving task. In *Proceedings of the 7th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction* (pp. 167-174). ACM.

Falzon, P. (2005). Ergonomie, conception et développement. *Conférence introductive, 40e Congrès de la SELF,* Saint-Denis, La Réunion, 21-23 septembre 2005.

Fishkin, K. P. (2004). A taxonomy for and analysis of tangible interfaces. *Personal and Ubiquitous Computing*, *8*(5), 347-358.

Fishman, B., Marx, R. W., Blumenfeld, P., Krajcik, J., & Soloway, E. (2004). Creating a framework for research on systemic technology innovations. *The Journal of the Learning Sciences*, *13*(1), 43-76.

Fitzmaurice, G. W., Ishii, H., & Buxton, W. A. (1995). Bricks: laying the foundations for graspable user interfaces. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems* (pp. 442-449). ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.

Folcher, V. (2003). Appropriating artifacts as instruments: When design-for-use meets design-in-use. *Interacting with Computers: the Interdisciplinary Journal of Human Computer Interaction*, 15(5), 648-663.

Fourgous, J.M. (2010). *Réussir l'école numérique.* Rapport de la mission parlementaire de Jean-Michel Fourgous, sur la modernisation de l'école par le numérique. http://lesrapports.ladocumentationfrancaise.fr/BRP/104000080/0000.pdf

Garrigou, A, Thibault, J-F., Jackson M. & Mascia, F. (2001). Contributions et démarche de l'ergonomie dans les processus de conception. In Pistes (http://www.pistes.uqam.ca/), vol. 3, n° 2, 18 p.

Gibson, J. J. (1977). The theory of affordances. In R. Shaw & J. Bransford (Eds.), *Perceiving, acting, and knowing: Toward an ecological psychology* (pp. 67-82). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Giroux, P., Coulombe, S., Cody, N., & Gaudreault, S. (2013). L'utilisation de tablettes numériques dans des classes de troisième secondaire : retombées, difficultés, exigences et besoins de formation émergents. *STICEF*, *20*.

Goel, V., & Pirolli, P. (1989). Motivating the notion of generic design within information-processing theory: The design problem space. *AI magazine*, *10*(1), 19.

Goigoux, R. (2007). Un modèle d'analyse de l'activité des enseignants. *Éducation & didactique*, *1* (3), 47-69.

Goldin-Meadow, S., Nusbaum, H., Kelly, S. D., & Wagner, S. (2001). Explaining math: Gesturing lightens the load. *Psychological Science*, *12*(6), 516-522.

Handelzalts, A. (2009). *Collaborative curriculum development in teacher design teams*. Doctoral dissertation, University of Twente.

Harel, I., & Papert, S. (1990). Software design as a learning environment. *Interactive learning environments*, *1*(1), 1-32.

Harris, J., & Hofer, M. (2009). Instructional planning activity types as vehicles for curriculum-based TP ACK development. In C. D. Maddux, (Ed.). *Research highlights in technology and teacher education 2009* (pp. 99-108). Chesapeake, VA: Society for Information Technology in Teacher Education (SITE).

Hatchuel, A. (2015). Apprentissages collectifs et activités de conception. *Revue française de gestion*, (8), 121-137.

Houdemont C., Kuzniak A. (1996). Autour des stratégies utilisées pour former les maîtres du premier degré en mathématiques, *Recherches en didactique des mathématiques*, *16* (3), 289-322

Hoyle C., Lagrange J.-B. (Eds) (2009). *Mathematical Education and Digital Technologies : Rethinking the terrain.* New York : Springer.

Hutchins, E. L., Hollan, J. D., & Norman, D. A. (1985). Direct manipulation interfaces. *Human–Computer Interaction*, *1*(4), 311-338.

Isabelle, C., Lapointe, C., & Chiasson, M. (2002). Pour une intégration réussie des TIC à l'école : de la formation des directions à la formation des maîtres. *Revue des sciences de l'éducation*, *28* (2), 325-343.

Ishii, H., & Ullmer, B. (1997). Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human factors in computing systems* (pp. 234-241). ACM

ISO 9241-210, *Ergonomie de l'interaction homme-système — Conception centrée sur l'opérateur humain*

ISO (1999). *ISO 13407 : Human-centred Design Processes for Interactive Systems*. Geneva: International Standards Organisation.

Joab, M., Guin, D., & Trouche, L. (2003). Conception et réalisation de ressources pédagogiques vivantes : des ressources intégrant les TICE en mathématiques. In *Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain 2003* (pp. 259-270). ATIEF ; INRP.

Jean-Daubias, S. (2004). De l'intégration de chercheurs, d'experts, d'enseignants et d'apprenants à la conception d'EIAH. In *Technologies de l'Information et de la Connaissance dans l'Enseignement Supérieur et de l'Industrie* (pp. 290-297). Université de Technologie de Compiègne.

Jeantet, A. (1998). Les objets intermédiaires dans la conception. Eléments pour une sociologie des processus de conception. *Sociologie du travail, 40* (3), 291-316.

Jonnaert, P., Barrette, J., Boufrahi, S., & Masciotra, D. (2004). Contribution critique au développement des programmes d'études : compétences, constructivisme et interdisciplinarité. *Revue des sciences de l'éducation*, *30* (3), 667-696.

Jordà, S., Geiger, G., Alonso, M., & Kaltenbrunner, M. (2007). The reacTable: exploring the synergy between live music performance and tabletop tangible interfaces. In *Proceedings of the 1st international conference on Tangible and embedded interaction* (pp. 139-146). ACM.

Kaptelinin, V., & Nardi, B. A. (2006). *Acting with technology: Activity theory and interaction design*. Mit Press.

Karsenti, T., & Fievez, A. (2013). L'iPad à l'école : usages, avantages et défis. *Montréal, QC : CRIFPE*.

Karsenti, T., Peraya, D., & Viens, J. (2002). Conclusion : bilan et prospectives de la recherche sur la formation des maîtres à l'intégration pédagogique des TIC. *Revue des sciences de l'éducation*, *28* (2), 459-470.

Kirsh, D., & Maglio, P. (1994). On distinguishing epistemic from pragmatic action. *Cognitive science*, *18*(4), 513-549.

Kjeldskov, J. (2003). *Human-computer interaction design for emerging technologies: virtual reality, augmented reality and mobile computer systems.* (Thèse de Doctorat), Aalborg University.

Knibbe, C., Falzon, P., Lémonie, Y. & Mégard, C. (2015a). Etude empirique des apports et limites d'une application tangible sur table interactive pour l'enseignement de la physique. In *Actes du Huitième Colloque de Psychologie Ergonomique (EPIQUE 2015).* (p. 333)

Knibbe, C., Mégard, C. Lémonie, Y. & Falzon, P. (2015b). Prospective analysis of innovative uses for tapletops in classrooms. In *Proceedings of the 19th Triennal Congress of the IEA*.

Koehler, M. J., & Mishra, P. (2005). What happens when teachers design educational technology? The development of technological pedagogical content knowledge. *Journal of educational computing research*, *32*(2), 131-152.

Koehler, M. J., Mishra, P., Kereluik, K., Shin, T. S., & Graham, C. R. (2014). The technological pedagogical content knowledge framework. In *Handbook of research on educational communications and technology* (pp. 101-111). Springer New York.

Koehler, M. J., Mishra, P., & Yahya, K. (2007). Tracing the development of teacher knowledge in a design seminar: Integrating content, pedagogy and technology. *Computers and Education, 49*(3), 740–762.

Koleva, B., Benford, S., Ng, K. Hui, & Rodden, T. (2003). A framework for tangible user interfaces. In *Physical Interaction (PI03) Workshop on Real World User Interfaces* (pp. 46-50).

Kubicki, S. (2011). *Contribution à la prise en considération du contexte dans la conception de tables interactives sous l'angle de l'IHM, application à des contextes impliquant table interactive RFID et objets tangibles*. Thèse, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis.

Kubicki, S., Lepreux, S., & Kolski, C. (2011, May). Evaluation of an interactive table with tangible objects: Application with children in a classroom. In *Procedings of the 2nd Workshop on Child Computer Interaction" UI Technologies and Educational Pedagogy", at CHI 2011 Conference*.

Labbo, L. D., Leu Jr, D. J., Kinzer, C., Teale, W. H., Cammack, D., Kara-Soteriou, J., & Sanny, R. (2003). Teacherwisdom stories: Cautions and recommendations for using computer-related technologies for literacy instruction. *The Reading Teacher*, *57*(3), 300-305.

Lachance, D. (1999). L'éducation et la maîtrise sociale des technologies. *In* M. Leclerc (dir.), *Disparition ou réorganisation du travail ?* (p. 127-138). Québec : Presses de l'Université du Québec.

Lagrange, J.-B. (dir.). (2013). *Les technologies numériques pour l'enseignement. Usages, dispositifs et genèses*. Toulouse : Octares

Lamonde, F. (2004). Les prescriptions des ergonomes. In P. Falzon (Ed.), *Ergonomie* (pp. 391-404). Paris : Presses Universitaires de France.

Lindgaard, G., Dillon, R., Trbovich, P., White, R., Fernandes, G., Lundahl, S., & Pinnamaneni, A. (2006). User Needs Analysis and requirements engineering: Theory and practice. *Interacting with computers*, *18*, 47-70.

Lombard. F. (2007). Du triangle de houssaye au tétraèdre des TIC : comprendre les interactions entre les savoirs d'expérience et ceux de recherche. In B. Charlier & D. Peraya (Eds.) *Les technologies éducatives : une opportunité d'articuler les savoirs d'expérience et ceux issus de la recherche ?* (104-119). Bruxelles : De Boeck.

Loup-Escande, E. (2010). *Vers une conception centrée sur l'utilité : une analyse de la co-construction participative et continue des besoins dans le contexte des technologies émergentes*. Thèse, Université d'Angers.

Maguire, M. (2001). Methods to support human-centred design. *International journal of human-computer studies*, *55*(4), 587-634.

Manches, A., & O'Malley, C. (2012). Tangibles for learning: a representational analysis of physical manipulation. *Personal and Ubiquitous Computing*, *16*(4), 405-419.

McKenney, S., Boschman, F., Pieters, J., & Voogt, J. (2016). Collaborative Design of Technology-Enhanced Learning: What can We Learn from Teacher Talk?. *TechTrends*, *60*(4), 385-391.

Mer, S., Jeantet, A. & Tichkiewitch, S. (1995). Les objets intermédiaires de la conception : modélisation et communication, In Caelen J. et Zreik K. (Ed.), *Le communicationnel pour concevoir*. Europia.

Miller, D., & Glover, D. (2013). Les technologies pour l'enseignement en Grande-Bretagne ; le développement professionnel des enseignants et le tableau numérique interactif. In J.-G. Lagrange (Ed.). *Les technologies numériques pour l'enseignement : usages, dispositifs et genèses* (pp. 23-36). Toulouse, France : Octares.

Mishra, P., & Koehler, M. J. (2006). Technological pedagogical content knowledge: A framework for teacher knowledge. *Teachers College Record*, *108*(6), 1017–1054.

Mollo, V. & Falzon, P. (2004). Auto- and allo-confrontation as tools for reflective activities. *Applied Ergonomics, 35*(6), 531-540.

Musial, M., Pradère, F., & Tricot, A. (2011). Prendre en compte les apprentissages lors de la conception d'un scénario pédagogique . *Recherche & formation*, (3), 15-30.

Nelson, J. (2011). *Contribution à l'analyse prospective des usages dans les projets d'innovation*. Thèse, Arts et Métiers ParisTech, Paris.

Nielsen, J. (1993). *Usability Engineering*. London: Academic Press.

Norman, D. A. (1980). Twelve issues for cognitive science. *Cognitive science*,*4*(1), 1-32.

O'Malley, C., & Fraser, D. S. (2004). *Literature Review in Learning with Tangible Technologies*. NESTA Futurelab.

Osborn, A.F. (1953). *Applied imagination : Principles and procedures of creative problem solving*. New York, NY : Scribner.

Pacurar, E. (2015). L'appropriation du tableau numérique interactif et du manuel numérique chez des enseignants du second degré : valeurs ressources et affordances contextuelles. *La Recherche en Education*, *13*, 78-101.

Papert, S. A. (1980). *Mindstorms: Children, Computers, And Powerful Ideas*. Basic Books.

Pastré, P., Mayen, P., & Vergnaud, G. (2006). La didactique professionnelle. *Revue française de pédagogie. Recherches en éducation*, (154), 145-198.

Patten, J., Ishii, H., Hines, J., & Pangaro, G. (2001). Sensetable: a wireless object tracking platform for tangible user interfaces. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems* (pp. 253-260). ACM.

Peraya, D., Lombard, F., & Bétrancourt, M. (2008). De la culture du paradoxe à la cohérence pédagogique. Bilan de 10 années de formation à l'intégration des TICE pour les futur-e-s enseignants du primaire à Genève. *Formation et pratiques d'enseignement en questions*, (7), 11-28.

Pernin, J. P., & Lejeune, A. (2004). Dispositifs d'apprentissage instrumentés par les technologies : vers une ingénierie centrée sur les scénarios. In *Technologies de l'Information et de la Connaissance dans l'Enseignement Supérieur et de l'Industrie* (pp. 407-414). Université de Technologie de Compiègne.

Pettenati, M. C., Giuli, D., & Khaled, O. A. (2001). Information technology and staff development: Issues and problems related to new skills and competence acquisition. *Journal of Technology and Teacher Education*, *9*(2), 153-170.

Price, S., Falcão, T. P., Sheridan, J. G., & Roussos, G. (2009, February). The effect of representation location on interaction in a tangible learning environment. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Tangible and Embedded Interaction* (pp. 85-92). ACM.

Prost, L. (2008). *Modéliser en agronomie et concevoir des outils en interaction avec de futurs utilisateurs : le cas de la modélisation des interactions génotype-environnement et de l'outil DIAGVAR*. Thèse, AgroParisTech.

Rabardel P. (1995). *Les hommes et les technologies, approche cognitive des instruments contemporains*. Paris, Armand Colin.

Rabardel, P. (2005). Instrument, activité et développement du pouvoir d'agir. In Philippe Lorino et Régine Teulier (Ed.). *Entre connaissance et organisation : l'activité collective* (pp. 251-265). La Découverte.

Rasmussen, J. (1986). *Information processing and human-machine interaction. An approach to cognitive engineering.* System science and engineering. Amsterdam : North-Holland.

Robertson, S. (2001). Requirements trawling: techniques for discovering requirements. *International Journal of Human-Computer Studies*, *55*, 405-421.

Rogalski J. (2008). Mise en regard des théories de Piaget et de Vygotsky sur le développement et l'apprentissage. F. Vandevrouck (s/d), *La classe de mathématiques : activités des élèves et pratiques des enseignants* (p. 431-445). Toulouse : Octares.

Rogers, Y., Lim, Y. K., Hazlewood, W. R., & Marshall, P. (2009). Equal opportunities: Do shareable interfaces promote more group participation than single user displays?. *Human–Computer Interaction*, *24*(1-2), 79-116.

Rosson, M. B. & Carrol, J. M. (2002). Scenario-Based Design. In J. Jacko & A. Sears (Eds.), *The Human-Computer Interaction Handbook: Fundamentals, Evolving Technologies and Emerging Applications* (pp. 1032-1050). Lawrence Erlbaum Associates.

Salehi, S., Schneider, B., & Blikstein, P. (2014, April). The effects of physical and virtual manipulatives on learning basic concepts in electronics. In *CHI'14 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (pp. 2263-2268). ACM.

Samurçay, R., & Rabardel, P. (2004). Modèles pour l'analyse de l'activité et des compétences, propositions. In R. Samurçay, & P. Pastré (Eds.), *Recherches en didactique professionnelle* (pp. 163-180). Toulouse : Octarès.

Sanchez, É., & Monod-Ansaldi, R. (2015). Recherche collaborative orientée par la conception. *Education & didactique*, *9* (2), 73-94.

Sandoval, W. A., & Bell, P. (2004). Design-based research methods for studying learning in context: Introduction. *Educational Psychologist*, *39*(4), 199-201.

Saujat, F. (2010). *Travail, formation et développement des professionnels de l'éducation : voies de recherche en sciences de l'éducation*. Note de synthèse pour l'Habilitation à Diriger des Recherches. Université de Provence – Aix-Marseille I.

Saujat, F., & Serres, G. (2014). L'activité de l'enseignant d'EPS entre préoccupations et » occupations" : un point de vue développemental. *eJRIEPS, (32),* 122-143.

Schneider, B., & Blikstein, P. (accepted). Using Exploratory Tangible User Interfaces for Supporting Collaborative Learning of Probability. *IEEE Transactions on Learning Technologies.*

Schön, D. A. (1992). Designing as reflective conversation with the materials of a design situation. *Research in Engineering Design*, *3*(3), 131-147.

Scott, S. D., Grant, K. D., & Mandryk, R. L. (2003). System guidelines for co-located, collaborative work on a tabletop display. In *ECSCW 2003* (pp. 159-178). Springer Netherlands.

Sfard, A. (1998). On two metaphors for learning and the dangers of choosing just one. *Educational researcher*, *27*(2), 4-13.

Shaer, O., & Hornecker, E. (2010). Tangible user interfaces: past, present, and future directions. *Foundations and Trends in Human-Computer Interaction*,*3*(1–2), 1-137.

Shaer, O., & Jacob, R. J. (2009). A specification paradigm for the design and implementation of tangible user interfaces. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, *16*(4), 20.

Shulman, L. S. (1986). Those who understand: Knowledge growth in teaching. *Educational researcher*, *15*(2), 4-14.

Shulman, L. (1987). Knowledge and teaching: Foundations of the new reform. *Harvard educational review*, *57*(1), 1-23.

Simon, H. A. (1973). The structure of ill-structured problems. *Artificial Intelligence, 4*, 181-201.

Simon, H. A. (1999). *The Sciences of the Artificial*. The MIT Press, 3rd edition.

Sluis, R. J. W., Weevers, I., van Schijndel, C. H. G. J., Kolos-Mazuryk, L., Fitrianie, S., & Martens, J. B. O. S. (2004). Read-It: Five-to-seven-year-old Children Learn to Read in a Tabletop Environment. In *Proceedings of the 2004 Conference on Interaction Design and Children: Building a Community* (pp. 73–80). New York, NY, USA: ACM.

Sperandio, J.-C. (2001). Critères ergonomiques de l'assistance technologique aux opérateurs. In B. Martin, G. Michel, I. Pecci, R. Vivian, J. Barcenilla, & E. Brangier (Eds.*), Actes du congrès JIM'2001 : Interaction Homme-Machine & Assistance,* Metz. Université de Metz.

Theureau, J., & Pinsky, L. (1984). Paradoxe de l'ergonomie de conception et logiciel informatique. *Revue des conditions de travail*, *9*, 25-31.

Tricot, A., & Plégat-Soutjis, F. (2003). Pour une approche ergonomique de la conception d'un dispositif de formation à distance utilisant les TIC. *Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Éducation et la Formation (STICEF)*, *10*, 27.

Ullmer, B., & Ishii, H. (1997). The metaDESK: models and prototypes for tangible user interfaces. In *Proceedings of the 10th annual ACM symposium on User interface software and technology* (pp. 223-232). ACM.

Ullmer, B., & Ishii, H. (2000). Emerging frameworks for tangible user interfaces. *IBM systems journal*, *39*(3.4), 915-931.

Ullmer, B., Ishii, H., & Jacob, R. J. (2005). Token+ constraint systems for tangible interaction with digital information. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, *12*(1), 81-118.

Van Den Hoven, E., & Eggen, B. (2004). Tangible computing in everyday life: Extending current frameworks for tangible user interfaces with personal objects. In *Ambient Intelligence* (pp. 230-242). Springer Berlin Heidelberg.

Veillard, L., Tiberghien, A., & Vince, J. (2011). Analyse d'une activité de conception collaborative de ressources pour l'enseignement de la physique et la formation des professeurs. Le rôle de théories ou outils spécifiques. *Activités*, *8* (8-2).

Vergnaud, G. (1991). La théorie des champs conceptuels. *Recherches en didactique des mathématiques,* 10 (2-3), 133-170.

Vermersch, P. (2006). *L'entretien d'explicitation : nouvelle edition enrichie d'un glossaire*. ESF editeur.

Villemonteix, F., & Khaneboubi, M. (2012). Utilisations de tablettes tactiles à l'école primaire. In *Journées Communication et Apprentissage Instrumentés en Réseau*. Université Picardie Jules Verne.

Vinck, D. (1999). Les objets intermédiaires dans les réseaux de coopération scientifique : Contribution à la prise en compte des objets dans les dynamiques sociales. *Revue française de sociologie, 40* (2), 385-414.

Vinck, D. (2009). De l'objet intermédiaire à l'objet-frontière. *Revue d'anthropologie des connaissances*, *3* (1), 51-72.

Visser, W. (1992). Designers' activities examined at three levels: Organization, strategies & problem solving. *Knowledge-Based Systems, 5*(1), 92-104.

Visser, W. (2009). La conception : de la résolution de problèmes à la construction de représentations. *Le travail humain*, *72* (1), 61-78.

Volman, M. (2005). A variety of roles for a new type of teacher educational technology and the teaching profession. *Teaching and Teacher Education*,*21*(1), 15-31.

Voogt, J., Westbroek, H., Handelzalts, A., Walraven, A., McKenney, S., Pieters, J., & De Vries, B. (2011). Teacher learning in collaborative curriculum design. *Teaching and Teacher Education*, *27*(8), 1235-1244.

Walker, D. F. (1971). A study of deliberation in three curriculum projects. *Curriculum Theory Network*, *2*(7), 118-134.

Wilson, A. D. (2005). PlayAnywhere: a compact interactive tabletop projection-vision system. In *Proceedings of the 18th annual ACM symposium on User interface software and technology* (pp. 83-92). ACM.

Annexes

Annexe 1 : Variabilité de l'enseignement-apprentissage

Afin d'avoir un aperçu de la variabilité dans les activités d'enseignement et d'apprentissage en physique-chimie, entre autres, une étude exploratoire a été menée auprès d'enseignants à partir d'une enquête en ligne, d'entretiens semi-directifs et d'observations en classe.

Méthode

Sur les 39 enseignants qui ont participé à l'enquête en ligne décrite précédemment dans l'étude prospective, les réponses des 5 enseignants de physique-chimie ont été synthétisées. Le questionnaire proposait des questions majoritairement ouvertes concernant les types de cours mis en place, le matériel utilisé (numérique ou non), leurs apports et leurs limites, et l'avis des enseignants sur les tables interactives et les tablettes tactiles et sur leur intérêt et leurs limites potentiels. Des entretiens semi-directifs ont également été menés avec 6 enseignants de physique-chimie ont été menés (45 minutes en moyenne). Des observations libres ont été réalisées dans les classes de 3 enseignants de collège (1 x 2 cours ; 1 x 3 cours ; 1 x 6 cours) afin de croiser les analyses et d'avoir un aperçu des activités d'enseignement et d'apprentissage en physique-chimie.

Les données recueillies ont été traitées qualitativement afin d'identifier des facteurs qui influent sur la complexité des pratiques enseignantes.

Résultats sur la variabilité des situations d'enseignement et d'apprentissage

En premier lieu, la plupart des enseignants sollicités mettent en œuvre la démarche d'investigation préconisée par les programmes scolaires. Par ailleurs, lorsqu'il y a des expériences à réaliser, les cours de physique-chimie ont généralement lieu dans des salles dédiées, car ils requièrent des conditions matérielles particulières. Les élèves sont répartis sur des « paillasses » plus grandes et plus hautes que des tables de cours habituelles, fixées au sol et disposant d'un accès à l'eau et à l'électricité pour les manipulations expérimentales, voire d'un poste informatique (cf. figure ci-dessous).



Exemples salle de cours de physique-chimie avec des « paillasses »

En dehors de cela, les situations de travail varient d'un établissement à un autre à différents niveaux, par exemple :

- Le nombre d'élèves par classe : de 24 à 28 élèves dans les classes observées ;
- L'organisation des cours en classe entière ou en demi-groupe ;
- La durée des cours, de 1 h à 1 h 20 ;
- Le matériel expérimental (p. ex. spectroscope ou prisme pour la décomposition de la lumière) ;
- Le matériel informatique disponible pour l'enseignant et/ou les élèves ;
- Le nombre d'enseignants de physique-chimie par établissement, leur formation ou leur expérience dans l'enseignement.

Cette diversité renvoie logiquement à des différences dans les pratiques professionnelles des enseignants. À titre d'exemple, les analyses réalisées ont montré que :

- La modélisation d'un même phénomène physique n'est pas abordée de la même façon par tous les enseignants interrogés : certains l'abordent à l'aide de schémas affichés ou dessinés au tableau ou sur un TNI, d'autres utilisent des animations, d'autres encore ne la traitent simplement pas, car ils n'en voient pas l'utilité ou la jugent trop difficile pour les élèves ;
- Les tâches d'apprentissage sur ordinateur peuvent porter sur la simulation d'un phénomène physique ; lorsque c'est possible, des enseignants utilisent des logiciels d'acquisition de mesures physiques pour ensuite en extraire des graphes ; l'utilisation d'internet pour la recherche documentaire n'est pas généralisée pour des raisons

techniques ; un enseignant utilise des boîtiers de vote numériques pour interagir avec la classe et faire prendre position aux élèves avant de débattre collectivement ;

En termes de supports d'enseignement, certains enseignants s'appuient sur le manuel scolaire, d'autres conçoivent eux-mêmes leur support de cours, en s'appuyant parfois sur des ressources pédagogiques conçues par des « enseignants ressources » (cf. les ressources Pégase). De plus, dans la mesure où tous les établissements n'utilisent pas toujours les mêmes manuels, le contenu des cours ainsi que le travail à la maison des élèves peuvent varier ;

- Les contraintes temporelles jouent un rôle important sur le contenu des enseignements. Plusieurs enseignants ont indiqué qu'ils devaient faire des choix dans les parties du programme, car ils n'avaient pas toujours le temps de tout traiter. Ainsi, la modélisation en optique en 4^{e} n'est par exemple pas toujours abordée ;
- Selon les enseignants et selon les thèmes traités, les protocoles expérimentaux peuvent être donnés par l'enseignant ou alors à définir par les élèves. Par la suite, le choix de l'expérimentateur dépend des contraintes de danger, de temps et de matériel ;
- Les élèves peuvent travailler individuellement, en binôme ou par groupe de quatre ; certains enseignants favorisent parfois le travail en autonomie sur une séance entière, alors que d'autres préfèrent le cadrer pour gagner du temps.

Ces exemples résultant d'une démarche d'analyse exploratoire permettent de confirmer l'hypothèse émise plus haut concernant la variabilité des pratiques enseignantes. Celle-ci doit par conséquent être prise en compte dans notre démarche de conception.

Annexe 2 : Principes physiques sous-jacents en optique de 4e

Cette annexe présente un résumé des principes physiques sous-jacents aux cours de physique de 4è sur l'optique.

La décomposition de la lumière blanche en lumières colorées

La lumière émise par le soleil est appelée « lumière blanche ». Celle-ci peut également être émise par des sources artificielles telles que des lampes à incandescence. La lumière blanche est composée de lumières colorées. Elles peuvent être observées à l'aide d'instruments qui permettent de décomposer la lumière blanche, tels qu'un prisme ou un réseau. Un prisme est un bloc transparent ayant une base triangulaire et un réseau est composé d'une surface striée de fines fentes parallèles et régulièrement espacées. Ces instruments permettent de décomposer la lumière blanche en une série de lumières colorées du violet au rouge, en passant par toutes les nuances de bleu, de vert, de jaune et d'orange. Ces lumières colorées sont présentes dans la lumière blanche et les instruments cités ne font que les séparer. Elles constituent le spectre de la lumière blanche.

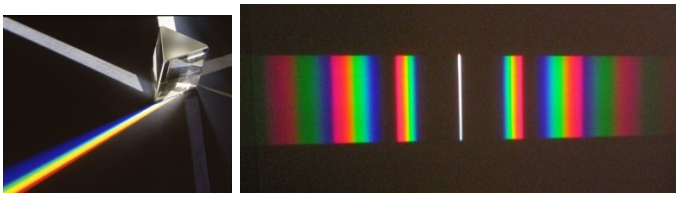


Illustration des notions physiques abordées et du matériel expérimental : décomposition de la lumière blanche par un prisme ; exemple de réseau ; décomposition de la lumière blanche par un réseau ; spectre de la lumière blanche

Les lumières colorées

Un filtre est un dispositif constitué d'une matière transparente colorée qui laisse passer la lumière en modifiant sa couleur. À partir d'une lumière blanche, il permet d'obtenir une lumière de sa propre couleur. Pour cela, il filtre, comme son nom l'indique, la couleur reçue et ne laisse passer que certaines lumières colorées en bloquant les autres. Par exemple, un filtre vert ne laisse passer que la lumière verte, mais absorbe les autres. Ainsi, une partie du spectre visible est absorbée par le filtre. En outre, la superposition de lumières de couleurs bleue, rouge ou verte permet de reconstituer des lumières colorées et la lumière blanche par synthèse additive.

La couleur des objets

Lorsqu'un objet opaque coloré reçoit de la lumière blanche, il en renvoie les lumières colorées de sa couleur et absorbe les autres. De même, s'il est éclairé par une lumière de sa couleur, il la renverra. En revanche, s'il est éclairé par une lumière de couleur différente de la sienne, par exemple une lumière verte sur un objet rouge, il l'absorbera et ne diffusera pas de lumière. Il sera alors vu comme un objet noir. Ainsi, la couleur perçue lorsqu'on observe un objet dépend de l'objet lui-même et de la lumière qui l'éclaire.

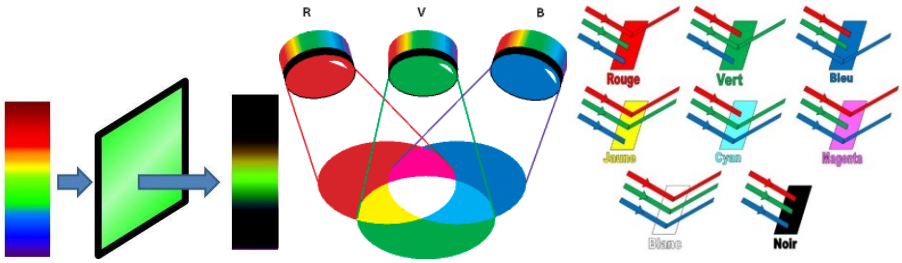


Illustration de l'effet d'un filtre coloré sur de la lumière blanche ; exemple de synthèse additive de lumières colorées ; exemple d'absorption et de diffusion de lumières colorées lorsqu'un objet coloré est éclairé en lumière blanche.

Annexe 3 : Codage des verbatim du chapitre 8

Cette annexe décrit en détails les traitement réalisés sur les verbatim du chapitre 8 avec les grilles de codage qui y sont présentées.

<table>
<tr><td colspan="3">[Verbatim 3] Génération d'une attente vis-à-vis de la technologie : permettre la projection au tableau de l'interface de la table interactive</td></tr>
<tr><td rowspan="5">[ENS 1]</td><td rowspan="5">Le passage sur la table [peut être] une étape dans l'activité
ou [...]un moment de bilan dans lequel on fait la synthèse des conclusions, on échange et quelques élèves peuvent montrer ce qu'ils pensent à la classe
en projetant
pour avoir des échanges.</td><td>Effet attendu</td></tr>
<tr><td>PCK : Rôle et place des étapes de simulation, de discussion collective ou de bilan dans le déroulement des TP-cours
+ Effet attendu</td></tr>
<tr><td>Génération d'une attente vis-à-vis de la technologie</td></tr>
<tr><td>PCK : Rôle et place des étapes de simulation, de discussion collective ou de bilan dans le déroulement des TP-cours
+ Effet attendu</td></tr>
<tr><td></td></tr>
<tr><td rowspan="4">DIDACT</td><td rowspan="4">Mine de rien je me disais que pour expliquer ce qu'ils ont fait

ça peut être bien
parce qu'ils ont du mal à expliquer ce qu'ils font, de raconter l'histoire de qu'est-ce qui leur a permis de comprendre…
La simulation pourrait aider. […] Ça va permettre de structurer son protocole en refaisant rapidement et en ajustant l'expérience.</td><td>PCK : Rôle et place des étapes de simulation, de discussion collective ou de bilan dans le déroulement des TP-cours</td></tr>
<tr><td>Effet attendu</td></tr>
<tr><td>PCK : Difficulté des élèves pour rendre compte de leur raisonnement</td></tr>
<tr><td>Effet attendu</td></tr>
<tr><td colspan="3">Effet attendu : [Innovation pratique] La projection de l'application permettrait à l'enseignant de faire son bilan ou de faire intervenir un (des) élève(s)</td></tr>
</table>

[Verbatim^4] **Génération d'une attente vis-à-vis de la technologie** : ***permettre à l'enseignant d'enrichir son cours en proposant de nouvelles « sources lumineuses » tangibles génériques***		
[ENS 1]	*Là où ça serait intéressant la simulation, ça serait de multiplier les exemples, c'est-à-dire **multiplier les sources**. (...)*	**Génération d'une attente** vis-à-vis de la technologie
	***Ça ferait une banque de situations**, ce qui n'est pas fondamental à dire vrai, mais ça offre cette possibilité et c'est intéressant. (...)*	**Effet attendu**
	*On pourrait se déplacer sur la table et essayer d'autres sources de lumières en utilisant l'objet spectroscope pour se déplacer sur les **différentes sources de lumières**. Par exemple la bougie, donc la flamme, une lampe, de type économie d'énergie… (...)*	***CK** : Un spectre lumineux dépend du type de source lumineuse*
[ERGO 2]	*Après on peut avoir des **objets génériques** : des objets qui vont changer de fonction d'un TP-cours à un autre. (...)*	***T*K** : Principe de fonctionnement et potentiel des objets tangibles*
[ENS 1]	*Ça devient **intéressant pour l'enseignant** alors ça,*	Effet attendu
	*d'avoir un **objet « outil » multifonctions**,*	***T*K** : Principe de fonctionnement des objets tangibles*
	*un **couteau suisse pour toutes les situations**,*	**Effet attendu**
	*avec des **images différentes***	***T*K** : Principe de fonctionnement et potentiel des objets tangibles*
	***selon les situations**. (...)*	**Effet attendu**
Effet attendu : [**Innovation pratique et technologique**] *Les objets génériques pourraient aider l'enseignant à enrichir son cours et à s'adapter à différentes situations*		

[Verbatim 5] **Transformation d'exigence physique** concernant la modélisation : ***la représentation du modèle RGB doit être remplacée par une représentation avec un spectre contenu dans une fenêtre sur la flèche représentant le trajet de la lumière***		
[ENS 2]	*Est-ce que ça serait intéressant d'**avoir une flèche plus épaisse**, et que cette flèche apparaisse blanche ? **Avec dedans un joli spectre** de la lumière blanche, un arc-en-ciel,*	**Transformation d'exigence physique** + **T*CK** : Possibilités offertes par la technologie
	*et puis ici (après réflexion sur l'objet rouge) une lumière qui n'ait **que les rayons rouges***	**CK** : Décomposition et absorption de la lumière blanche
DIDACT	*Moi je verrais bien deux choses : [le niveau] « **Lumière blanche** » et puis ça (la flèche), du coup ça ferait un autre niveau*	**CK** : Modèles physiques existants
	*Ça **montrerait de quoi est composée la lumière blanche** ;*	**Effet attendu**
	*la lumière blanche c'est ça (spectre de toutes les couleurs). Je trouve que c'est **bien pour montrer les couleurs** proches du rouge. [...]*	**CK** : Décomposition et absorption de la lumière blanche
	*Et là du coup c'est le **niveau intermédiaire dont on a besoin avant le modèle.** [...]*	**PCK** : Objectif de l'enseignant de parvenir à amener le modèle de façon cohérente aux élèves
[ENS 2]	*Parce que ça me plaît énormément, **les élèves ils voient bien le truc**, **enfin j'ai l'impression***	**PCK** : Représentation de la compréhension par les élèves + **Effet attendu**
DIDACT	*Du coup ça peut être le **niveau qui permettrait de passer à ça ensuite** (au vrai modèle théorique) ?*	**PCK** : Objectif de l'enseignant de parvenir à amener le modèle de façon cohérente aux élèves + **Effet attendu**
Effet attendu : [**Innovation pratique**] *L'ajout d'un niveau de modélisation entre la simulation et le modèle géométrique devrait faciliter la compréhension du lien entre ces deux niveaux de représentation par les élèves*		

[Verbatim 6] **Transformation d'exigence prescriptive** : ***l'introduction du modèle doit se faire dans le TP-cours n ° 2 et plus dans le n° 3***

DIDACT	***Ça c'est le spectre****. Et puis il s'étend et puis quand il passe derrière l'objet transparent…*	**T*CK** : État de l'application tangible résultant de choix de conception antérieurs
[ENS 2]	*En réalité **on est en train de parler de l'activité 3** parce que **cette activité 3** en fait **introduit un modèle** et c'est vrai que ce modèle, c'est **ce qui nous posait problème** jusqu'à présent.*	**PCK** : Contenu des activités existantes et enchainement dans la séquence
		PCK : difficultés rencontrées par les enseignants et les élèves
DIDACT	*Et que finalement, là **le modèle il est plus introduit à l'activité 3, mais à l'activité 2** avec le spectroscope et du coup il est réutilisé à l'activité 3, **ce qui est mieux**.*	**Transformation d'exigence prescriptive** + **Effet attendu**

Effet attendu : [**Innovation pratique**] *L'intégration du modèle dès l'activité 2 permettrait de l'aborder plus tôt dans la séquence et ainsi que les élèves se l'approprient davantage*

[Verbatim 7] **Génération d'une exigence physique** : ***ajouter une source « néon » dans la simulation suite à une modification du scénario du TP-cours 2, dans la partie « pour aller plus loin »***

[ENS 1]	*Moi **dans le « pour aller plus loin »,** je les ferais **observer une source de lumière artificielle***	**PCK** : Les scénarios existants comportent une étape « pour aller plus loin » dans laquelle les élèves comparent le spectre d'un néon avec celui du soleil
	*pour **qu'ils comprennent qu'il y a des différences**, mais que l'œil ne les voit pas. […]*	**Effet attendu**
DIDACT	*Alors « pour aller plus loin » **on peut mettre d'autres objets** [sources lumineuses].*	**CK** : Un spectre lumineux dépend du type de source lumineuse
[ENS 2]	*Du coup dans l'histoire, il faudrait **rajouter un tube néon** qui serait une source*	**Génération d'une exigence physique**
	*qui enverrait de la **lumière sous forme de raies spectrales.***	**CK** : propriétés du spectre lumineux d'un néon

Effet attendu : [**Intégration techno et Innovation pratique**] *L'ajout d'un néon parmi les sources de la simulation permettrait aux élèves de mieux comprendre les différences entre les types de sources lumineuses dans la partie « Pour aller plus loin »*

[Verbatim 8] **Génération de spécification interactionnelle** et **physique** : ***le modèle doit s'afficher en découpant l'écran par interactions tactiles et en changeant l'échelle de la simulation pour qu'elle apparaisse en parallèle du modèle***

[ERGO 2]	*On peut faire quelque chose qui rétrécit l'échelle de l'image, et vu qu'il ne reste que les trucs virtuels, **on peut réduire la fenêtre dans l'écran**…*	**T*CK** : Possibilités de représentation de ce qui est affiché sur l'écran
[ENS 2]	*Ce que tu viens de dire (s'adresse à [ERGO 2]), ça vient de me donner une idée, on pourrait faire comme ça, là-dessus il y aurait le fameux dessin et puis **on met son doigt ici et son doigt ici** (dans les deux coins gauches) et hop **ça réduit la taille de ça** (les images des objets tangibles). Et **ça ouvre une deuxième fenêtre**, avec la taille des images d'objets réduisant, **ça fait grossir une sorte de modèle** ici (dans la nouvelle fenêtre). […]*	**Génération de spécification interactionnelle et physique** + **T*K** : Connaissances sur les interactions tactiles possibles sur la table interactive
[ERGO 2]	*Oui justement c'était pour ne pas les perdre (les élèves) puisque tu disais qu'ils auraient peut-être du mal à comprendre…*	**T*PACK** risques de difficultés pour les élèves d'après les enseignants
[ENS 2]	*Oui je trouve ça très bien en fait.*	
DIDACT	*Ouais c'est ça, on pourrait les mettre n'importe où après (les objets tangibles avant de les enlever pour laisser les images). On met un doigt de chaque côté ici et hop ça réduit la taille de ça, et ça ouvre*	**Génération de spécification interactionnelle** et **physique** + **T*K** : Connaissances sur les

	un modèle qui soit dans la même orientation. *Je pense que ça serait pas mal comme ça.*	interactions tactiles possibles sur la table interactive

Effet Attendu : [**Intégration techno et Innovation techno**] *La séparation de l'écran en deux devrait faciliter la compréhension des niveaux de représentation pour les élèves en les affichant en parallèle et en dynamique*

[Verbatim 9] **Transformation de spécification physique :** ***la représentation du modèle doit être affichée en parallèle de la simulation tangible, sur un fond blanc***

[ERGO 2]	*Alors ça c'est une autre question, celle du changement de représentation quand on passe… En fait* ***on est partis sur 2 fenêtres*** *et on avait pensé à d'autres alternatives en fait. L'avantage des deux fenêtres, c'est que ça* ***permet de faire une séparation claire entre modèle et expérience***. *Ca c'est quelque chose qui semble important. [...]*	**T*CK** : État de la solution résultant de choix précédents
DIDACT	*Ouais on s'était dit qu'****il fallait faire attention****,*	**PCK** : besoin de distinguer les niveaux de représentation (modèle et simulation)
	alors peut-être alors je ne sais pas, si au niveau des ***affichages de fond de couleur****…*	**T*CK** : possibilités offertes par la technologie pour représenter des la modélisation
[ERGO 2]	*Exactement, c'est aussi à ça que j'ai pensé, de faire peut-être* ***un fond blanc*** *pour le modèle comme ça on aurait le* ***modèle en noir****, enfin juste en trait tout ça, et* ***en parallèle***.	**Transformation de spécification physique**
DIDACT	*Du coup* ***ça permet d'avoir le trait noir*** *(du modèle du rayon lumineux) […]*	**Effet attendu**

Effet attendu : [**Intégration techno et Innovation techno**] *L'affichage du modèle sur un fond blanc en parallèle de la simulation devrait permettre de séparer les deux niveaux de représentation pour que les élèves les différencient, en gardant la représentation du modèle géométrique habituelle*

[Verbatim 10] **Transformation de spécification interactionnelle** : ***la transition du modèle du rayon de lumière au modèle intermédiaire avec le spectre doit se faire en posant le spectroscope dans la simulation***

DIDACT	*On a une idée là ! Vas-y [ENS 2]*	
[ENS 2]	*Le spectroscope justifie en fait* ***le fait de devoir écarter le****… tu sais faire le [geste en écartant les doigts comme pour zoomer = spread].*	***T*K** : possibilités offertes par la technologie en termes d'interactions tactiles et tangibles*
	Du coup au lieu de [spread] ***on met le spectroscope****. Tout simplement.*	**Transformation de spécification interactionnelle**
DIDACT	*Entre ce passage-là et là,* ***on avait dit qu'on mettait les doigts sur la flèche et qu'on écartait.*** *Donc on « pinchait incspread]. Et la nouvelle* ***idée c'était*** *d'associer la flèche, enfin quand tu fais* ***l'association terme à terme*** *comme si on avait une analogie.*	**T*CK** : État antérieur de la solution
	Mais *ce n'est pas une analogie,* ***c'est une modélisation****. Donc l'œil-l'œil, le soleil-la source de lumière, et puis tu as la flèche-le spectroscope. Donc je pense qu'en fait il faut qu'on enlève le spectroscope parce qu'il n'a rien à faire en fait dans la représentation de la visualisation de la lumière****. La visualisation de la lumière en termes de rayon en fait c'est sans le spectroscope.***	**T*PACK** : Besoin de cohérence et de rigueur dans l'articulation entre différents niveaux de représentation d'un point de vue physique
	Quand on place le spectroscope *en fait, on a* ***la flèche*** *qui* ***se dilate***.	**Transformation de spécification interactionnelle**
[ERG	*C'est pour faire la transition en fait ?*	

O 2]		
DIDACT	*Voilà et **du coup on a 3 niveaux**, mais qui apparaissent comme étant 3 niveaux et non pas comme des superpositions de modèles,*	**Effet attendu**
	*parce que c'est ce qui était un petit peu **gênant d'avoir ces deux modèles qui vivaient en parallèle**, c'est qu'il y a un niveau qui nécessite un instrument.*	**T*PACK** : Besoin de cohérence et de rigueur dans l'articulation entre différents niveaux de représentation d'un point de vue physique
Effet attendu : [**Intégration techno et Innovation pratique**] *L'utilisation du spectroscope pour passer du modèle du rayon lumineux à une modélisation avec des spectres lumineux devrait assurer la cohérence entre ces niveaux de représentation et permettrait de mieux articuler la transition entre ces niveaux*		

[Verbatim 11] **Génération de spécification physique** : ***la forme de l'objet source doit représenter une boule sur un socle.***

[ERGO 2]	*Et pour la forme de la source ? Parce que ça c'était un objet proposé par un designer…*	
DIDACT	*En fait j'aurais bien vu plus **une forme de soleil, une boule sur un socle,***	**Génération de spécification physique**
	*qui donne **l'idée que la propagation se fait dans toutes les directions.***	**Effet attendu**
[ERGO 2]	*Et au niveau de la métaphore quand on mettra d'autres sources plus tard, est-ce que ça va être cohérent ?*	
[ENS 2]	*Oui je pense, c'est **une forme générique**.*	**Effet attendu**
DIDACT	*Ça peut **faire penser à une ampoule, à un soleil**...*	**PCK** : Représentation commune des sources lumineuses en physique + Effet attendu
[ENS 2]	*Les élèves **il faut qu'ils sachent que c'est une source**.*	**T*CK** : Besoin de proposer des représentations compréhensibles pour les élèves
	*Alors s'ils ont un objet qui ressemble un peu à un soleil**, ça peut** éventuellement **les orienter vers l'idée que c'est une source.***	**T*CK** : Besoin de proposer des représentations compréhensibles pour les élèves + **Effet attendu**
[ERGO 2]	*Pour la source générique, il faut faire un compromis entre la forme de l'objet et les dessins spécifiques.*	
[ENS 2]	*Si tu mets **une sphère**, ça peut être pas mal du coup.*	**Génération de spécification physique**
DIDACT	*Oui les **objets tangibles** doivent servir d'**intermédiaire entre le réel et le** modèle, donc leur représentation doit être entre les deux.*	**T*PACK** : rôle des objets tangibles dans les niveaux de représentation proposés par l'application tangible
	*Pour **la lumière**, c'est souvent **quelque chose qui « diffuse »**.*	**PCK** : Représentation commune des sources lumineuses en physique
Effet attendu [**Intégration techno**] : *Le choix d'une forme d'objet générique assez abstraite pour la source devrait rendre sa fonction compréhensible par les élèves*		

[Verbatim 12] **Transformation de spécification physique** : ***l'objet source générique doit être modifié en agrandissant la sphère et en diminuer le socle***

[ERGO 1]	***Il y a un problème** de rapport entre le pied… enfin le pied il est aussi grand que… (la boule), donc du coup ça fait plus poignée de porte.*	**T*CK** : solution proposée pour représenter les sources tangibles
DIDACT	*C'est pour ça que moi **je voyais plus la boule de cristal** tu vois.*	**T*CK** : solution proposée pour représenter les sources tangibles

		+ **Effet attendu**
[ERGO 2]	*Donc on fait le **pied plus petit** ?*	**Transformation de spécification physique**
DIDACT	*Ouais.*	
[ERGO 1]	*Et la **boule plus grosse** quoi.*	**Transformation de spécification physique**
DIDACT	*Donc il faudrait un **plus petit socle**.*	**Transformation de spécification physique**
Effet attendu (implicite) [**Intégration techno**] : *Augmenter la taille de la sphère et diminuer celle du socle de la source générique devrait donner meilleure représentation en termes de métaphores*		

[Verbatim 13] **Transformation de spécification physique** concernant la modélisation proposée dans une version du prototype : ***le sens de la flèche contenant le spectre dans la modélisation doit être inversé***		
[ENS 2]	*Si je peux me permettre, **la flèche avec le spectre** [dans le prototype d'application tangible],* *elle **devrait être dans l'autre sens**,* *car **ça correspond à la flèche du rayon lumineux** qui est en dessous.*	**T*CK** : solution proposée pour représenter le spectre sur le rayon lumineux **Transformation de spécification physique** **CK** : sens de propagation de la lumière dans le modèle du rayon de lumière
DIDACT	*Oui parce que tu as quand même un **sens d'illumination.***	**CK** : sens de propagation de la lumière dans le modèle du rayon de lumière
[ENS 1]	*Oui moi je suis d'accord, c'est ce que j'allais dire.*	
[ENS 2]	*Sinon on a **l'impression que la lumière elle part de l'œil.***	**T*CK** : solution proposée pour représenter le spectre sur le rayon lumineux + **Effet attendu**
Effet attendu : [**Intégration techno**] *L'inversion du sens du spectre sur le rayon lumineux permettrait d'être en conformité avec le modèle physique sous-jacent*		

[Verbatim 14] **Génération de spécification prescriptive** : ***le vidéoprojecteur relié à une table interactive doit être placé à côté de la celle qui est la plus proche du tableau, qui accueillera 4 élèves au plus***		
[ERGO 2]	*Et le **vidéoprojecteur** finalement **il va où ?***	**TPK** : Matériel actuel disponible pour la projection
[ENS 2]	*Il est accroché **au plafond**.*	**TPK** : Matériel actuel disponible pour la projection
[ERGO 2]	*Et celui qu'on ramène pour projeter ce qu'il y a sur la table [interactive] ?*	
[ENS 2]	*On **pourra le caler** sans problème,*	**T*PK** : Organisation spatiale de la classe avec des tables interactives
	*j'ai récupéré un **chariot à roulette**.*	**TPK** : Matériel actuel disponible pour la projection
	*qui peut aller **ici** [sur le plan de salle]. [...]*	**T*PK** : Organisation spatiale de la classe avec des tables interactives
[ENS 1]	*Du coup si tu mets le **rétro à côté de la table interactive**, ça veut dire qu'il faut qu'il n'y ait **que 4 élèves sur celle-là**,*	**Génération de spécification prescriptive**
	***sinon ils seront serrés**.*	**T*PK** : nombre d'élèves qu'une même table peut accueillir selon l'espace disponible
Effet attendu (implicite) : [**Intégration pratique**] *L'ajout d'un vidéoprojecteur nécessaire pour certaines étapes du TP-cours impactera la répartition des élèves sur les tables interactives*		

[Verbatim 15] **Génération d'exigence prescriptive** : ***projeter la simulation pour corriger les exercices en classe***

[ENS 1]	***Dans les corrections d'exercices*** *qu'on propose et qu'on corrige dans la séance suivante, on y fait* ***appel*** *aussi* ***au modèle, pour expliquer****.*	**PCK** : pratique habituelle pour la correction des exercices à la maison
[ERGO 2]	*Est-ce que ça pourrait être intéressant* ***que toi pendant la correction tu utilise la projection*** *de ce qui est sur la table ? Que toi tu aies recours au* ***modèle pour expliquer aux élèves*** *le modèle ?*	**T*CK** : possibilités de projection de l'interface de l'application tangible de simulation + **Génération d'exigence prescriptive**
[ENS 2]	*Ou* ***un élève*** *!*	**Génération d'exigence prescriptive**
[ERGO 2]	*Oui, voilà exactement ! Ça sort un peu du scénario, mais ça reste* ***cohérent a priori avec l'application****.*	**T*CK** : état actuel de l'application tangible
[ENS 1]	*Ouais* ***plutôt que de faire nos traits de couleurs*** *sur le tableau pour expliquer...*	**PCK** : pratique habituelle pour la correction des exercices à la maison + **Effet attendu**

Effet attendu (implicite) : [**Innovation pratique**] *La projection de l'application tangible permettrait à l'enseignant ou à un élève d'illustrer la correction des exercices à la maison de façon plus riche qu'habituellement*

[Verbatim 16] **Transformation de spécification physique** : ***l'image du soleil doit être remplacée par une image de ciel avec un soleil plus petit et des nuages autour***

[ENS 2]	*Le problème c'est qu'****on leur a dit juste avant de ne pas regarder le*** *soleil (lors de l'expérience réelle).*	**TPCK** : consignes données aux élèves pour les tâches expérimentales
	Là on leur dit de regarder le soleil *pour avoir le spectre (dans la simulation). C'est l'opposé.*	**T*PACK** : État de la solution pour la représentation de la source soleil et consigne prévue
DIDACT	*Et si* ***on fait un tout petit soleil*** *? Tu vois si l'image qui est là…*	**Transformation de spécification physique**
[ENS 1]	*Ah oui un petit soleil d'accord.*	
DIDACT	*Du coup on aurait notre objet qui est posé et* ***un petit soleil à côté et des petits nuages autour.***	**Transformation de spécification physique**
[ENS 2]	*Ça, c'est pas mal,* ***ça serait bien****. Ça serait un* ***bon compromis.***	**Effet attendu**
DIDACT	*Donc on* ***change le dessin du soleil pour celui d'un ciel****.*	**Transformation de spécification physique**
[ENS 2]	*Donc ça veut dire qu'on aura* ***l'objet et à côté un ciel avec un tout petit soleil****.*	**Transformation de spécification physique**

Effet attendu (implicite) : [**Intégration Techno**] *Le choix d'une image de ciel avec un soleil et des nuages de taille réduite devrait assurer une cohérence avec l'expérience réelle*

[Verbatim 17] **Transformation et génération d'exigences prescriptives** en lien avec la projection de l'application tangible : ***la projection doit être utilisée par l'enseignant dans la phase de « réponse de la classe » avec les élèves assis à leur place***

[ERGO 2]	*À quel moment du cours tu penses que tu peux utiliser la projection ?*	
[ENS 2]	*Dans la partie* ***réponse de la classe****,*	**Transformation d'exigence prescriptives**

]	*c'est une **sorte d'institutionnalisation** qui va se mettre **avant le bilan**. Les élèves vont faire une **sorte de correction de ce qu'ils auront fait** avant et c'est là qu'**on va discuter**, **se mettre d'accord sur leurs conclusions***	**T*PACK** : Déroulement type des TP-cours par rapport à la démarche d'investigation et rôle des différentes sous-tâches + **Effet attendu**
	*et là c'est le **moment où** justement **on projette**.*	**Transformation d'exigence prescriptives**
	*D'ailleurs à ce moment-là **les élèves ils sont où** ? Autour des tables interactives ? Assis à leur place ?*	
DIDACT	*Il vaut mieux les **renvoyer à leur place**, tu ne vas pas les laisser debout les pauvres.*	**Génération d'exigence prescriptive**
[ENS 2]	*Ok mais le problème c'est qu'**à leur place**, **ils regardent un mur,***	**T*PK** : Organisation prévue de la salle de classe avec les tables interactives
	*donc **il faut qu'ils tournent** leur chaise.*	**Génération d'exigence prescriptive**
[ERGO 2]	*Donc tu les fais se lever juste le temps de manipuler la simulation ?*	
[ENS 2]	*Oui.*	
Effet attendu (implicite) : [**Intégration pratique** et **Innovation pratique**] *La projection de l'interface de l'application tangible devrait permettre d'illustrer les échanges lors de l'étape intitulée « réponse de la classe »*		

[Verbatim 18] **Évaluation de solution prescriptive** lors des expérimentations en classes : ***sur l'intervention d'un élève sur l'application tangible pendant la réponse de la classe***

[ERGO 2]	*À un moment **tu as fait intervenir un élève dans la réponse de la classe** [en projetant au tableau]… […]*	**T*PACK** : Activité de l'enseignant avec l'application tangible
[ENS 2]	***C'était bien hier**, mais **aujourd'hui je n'ai pas su faire**. Tu as vu ?*	**T*PACK** : Activité de l'enseignant avec l'application tangible + **Évaluation de solution prescriptive** lors des expérimentations en classes
[ERGO 2]	*Oui hier c'était **très dynamique**, il y avait **un élève qui manipulait** et **tu interagissais avec le reste des élèves**. Alors qu'**aujourd'hui** tu interrogeais seulement l'élève qui manipulait les objets tangibles.*	**T*PACK** : Activité de l'enseignant avec l'application tangible
[ENS 2]	*Oui je suis d'accord, mais **aujourd'hui je n'ai pas su faire**.*	**T*PACK** : Activité de l'enseignant avec l'application tangible
[ERGO 2]	*Et tu penses que ça vaut le coup ou que c'est gadget ?*	
[ENS 2]	*Non **c'était très bien ce qui s'est passé hier**.*	**T*PACK** : Activité de l'enseignant avec l'application tangible + **Évaluation de solution prescriptive** lors des expérimentations en classes
Effet attendu (implicite) : [**Innovation pratique**] *Faire intervenir un élève sur la simulation devant la classe pendant la réponse de la classe peut améliorer cette étape du TP-cours et devrait y être intégré*		

[Verbatim 19] **Génération de spécification physique** concernant la source lumineuse lors des expérimentations en classes : ***ajouter un message lorsque le spectroscope est dirigé directement vers l'image du soleil : « Attention il ne faut pas regarder directement le soleil »***

[ENS 2]	*Tu sais dans la représentation du ciel, il y a un soleil.*	**T*CK** : État de la solution déployée dans les expérimentations en classes
	Des élèves ont tourné le soleil pour le mettre pile en face du spectroscope.	**T*PACK** : Activité des élèves avec l'application tangible lors des expérimentations en classe

[ERGO 2]	*Alors que tu leur précisais de ne pas observer directement le soleil ?*	
[ENS 2]	*Oui, alors je sais ce qu'on pourrait faire : On pourrait afficher un message*	**T*CK** : Possibilité d'afficher des informations textuelles dans l'application de simulation tangible + Génération de spécification physique
	« attention il ne faut pas regarder directement le soleil »	**CK** : Danger d'observer directement le soleil avec le spectroscope + **Génération de spécification physique**
	Parce que ça ne doit pas être compliqué à programmer.	**T*CK** : Possibilité d'afficher des informations textuelles dans l'application de simulation tangible
Effet attendu (implicite) : [**Intégration techno**] *L'ajout d'un message textuel devrait favoriser la cohérence entre les manipulations expérimentales et en simulation en insistant sur les risques d'observer directement le soleil.*		

[Verbatim 20] **Transformation de spécification physique** : ***ajouter une source tangible bougie***		
[ERGO 2]	***Dans la correction** des exercices aujourd'hui, tu as donné **l'exemple d'une bougie** demandant quel était son spectre.*	**T*PACK** : Activité de l'enseignant dans la correction des exercices en classe
	*Est-ce que ça t'intéresserait d'avoir une **bougie parmi les sources lumineuses déjà disponibles** ?*	**Transformation de spécification physique**
[ENS 2]	*J'en ai rêvé !*	
[ERGO 2]	*Ça permettrait **d'utiliser la table pour** illustrer **d'autres parties du cours.***	**Effet attendu**
Effet attendu : [**Innovation pratique** et **Innovation techno**] *L'ajout d'une source bougie devrait permettre à l'enseignant d'étoffer son cours avec différentes illustrations possibles pour les sources tangibles*		

[Verbatim 21] **Génération d'attente** : ***utiliser l'application tangible avec la modélisation dans la phase d'évaluation***		
[ENS 2]	*Ça serait intéressant de **faire l'évaluation notée avec l'application tangible.***	**PCK** : Déroulement habituel de la séquence qui se termine par une évaluation + **Génération d'attente**
[ERGO 2]	*C'est vrai qu'on ne sait pas s'ils manipulent tous finalement.*	
	*Est-ce qu'ils sont **tous capables de refaire une simulation ?***	
[ENS 2]	*Oui on pourrait **voir ça dans l'évaluation**.*	**Effet attendu**
Effet attendu : [**Innovation pratique**] *L'ajout d'une phase avec l'application tangible dans l'évaluation permettrait d'évaluer la compréhension des élèves par rapport à cet outil*		

[Verbatim 22] **Évaluation de la solution prescriptive** : ***validation des objectifs d'apprentissage liés au modèle et sur le statut de la simulation par rapport à la réalité***		
[ERGO 2]	Face à un **bug dans le modèle**,	**T*CK** : État de l'application lors des expérimentations
	C'est intéressant de voir que **des élèves ont compris ce qu'il aurait dû y avoir** normalement.	**T*PACK** : Activité des élèves avec l'application tangible lors de la manipulation du cadre de modélisation en lien avec la simulation
	Et pour toi [ENS 1], quand tu as **découvert ce**	**T*PACK** : Activité de l'enseignant avec les

	bug […], dans le [groupe suivant] suivant tu l'as **contourné** en évitant par exemple de distribuer l'objet blanc et en verbalisant sur ce qu'il devrait donner dans le modèle sans le poser.	élèves lors de la phase de simulation
[ERGO 1]	Mais là les élèves le **découvrent d'elles-mêmes**,	**T*PACK** : Activité des élèves avec l'application tangible lors de la manipulation du cadre de modélisation en lien avec la simulation
	c'est bien ça, ça montre **qu'elles ont compris**	**Évaluation de la solution prescriptive**
[ENS 2]	Oui tout à fait, ils ont découvert les **limites de l'outil**.	**Effet attendu**
[ENS 1]	**Ça fait plaisir à voir.**	**Évaluation de la solution prescriptive**
Effet attendu : [**Innovation pratique**] Malgré la présence d'un bug sur l'interface, des élèves semblent avoir fait la distinction entre le réel et la simulation en mettant en avant les limites de celle-ci.		

[Verbatim 23] **Transformation d'exigence prescriptive** : ***proposer aux élèves une tâche de comparaison de ce qu'ils voient dans le modèle par rapport au réel et à la simulation***		
[ERGO 2]	*Quand on est dans la réalité, on part de **phénomènes** et d'objets **réels** avec les expériences, ensuite on passe à la **virtualité augmentée** où on passe sur la table interactive avec de nouveaux objets, de nouvelles images et de nouvelles représentations. Le **modèle interactif**, c'est pareil, on a de nouvelles images avec les schémas, et par contre quand on revient au **modèle**, souvent le modèle interactif était projeté au tableau et complété pour avoir ce modèle. Du coup, on a **moins de différence entre ces deux derniers niveaux de représentation**.*	**T*PACK** : Etat de l'application tangible lors des expérimentations en classe et de l'articulation entre les niveaux de représentation proposée
DIDACT	*En gros, on arrive à **confondre des modèles scientifiques** pour la synthèse additive ou soustractive ou **le modèle de l'optique** géométrique, etc**. avec ce truc-là** [le modèle interactif]…*	**T*PACK** : Difficultés rencontrées par les élèves pour articuler les niveaux de représentation proposées dans l'application tangible
[ENS 2]	*Qui sert de modèle !*	
DIDACT	*De modèle de substitution. Et moi j'avais fait **l'hypothèse que le modèle interactif** permettrait de **combiner les différents niveaux de représentation pour arriver au modèle**.*	**T*PACK** : Hypothèses antérieures sur l'activité des élèves avec l'application tangible
[ERGO 2]	*Oui on avait tous fait cette hypothèse en fait.*	
DIDACT	*Et là ce qui m'embête c'est qu'on a moins ce **lien entre réel et modèle scientifique** au final.*	**T*PACK** : Etat de l'application tangible lors des expérimentations en classe et de l'articulation entre les niveaux de représentation proposée
	*Donc **on va revoir les textes des activités pour renforcer ce lien***	**Transformation d'exigence prescriptive** **Effet attendu**
	*en **demandant aux élèves de bien comparer** avec la réalité par exemple.*	**Transformation d'exigence prescriptive**
	*On peut leur dire qu'on va leur donner un objet qui permet de voir la situation différemment et après **leur demander d'identifier ce qu'on voit** dans le modèle qu'on ne voyait pas avant ou qu'est-ce qu'on ne voit plus.*	**Transformation d'exigence prescriptive**
	*Par exemple la **source de lumière** dans le modèle, on ne voit plus le ciel, les nuages ou le soleil parce que ce n'est **pas important dans le modèle : on ne voit qu'un point**.*	**PCK** : Différences entre les niveaux de représentation par rapport à des objectifs didactiques
	*Parce que **sinon** on leur donne ça, mais **ils ne savent pas***	**T*PACK** : Difficultés rencontrées par les

	quoi en faire. *Alors que s'ils **doivent repérer les différences**,* *Ça les oblige à **faire des allers-retours avec la simulation ou le réel.***	élèves pour articuler les niveaux de représentation proposées dans l'application tangible **Transformation d'exigence prescriptive** **Effet attendu**
[ERGO 2]	*Oui il faut leur donner une tâche à réaliser, un objectif, parce que là c'est un trop contemplatif. Comme un problème à résoudre pour qu'ils soient moins passifs.*	
Effet attendu : [**Intégration pratique** et **Innovation pratique**] *Modifier les consignes devraient permettre aux élèves de se poser des questions pertinentes pour comprendre le lien entre les modélisations proposées par l'application et la réalité.*		

Annexe 4 : Documents « élèves » représentant les scénarios pédagogiques finaux

Cette annexe présente les documents fournis aux élèves par l'enseignant. Ils rendent compte de la structure des TP-cours reformulés

Activité 2 : le spectroscope

Philémon a acheté un drôle d'appareil au vide grenier de son village. L'ancien propriétaire lui a dit que c'était un instrument d'optique appelé spectroscope qui permet de décomposer la lumière. Philémon se demande se qu'il pourrait voir dans le spectroscope s'il l'oriente vers le ciel.

Prévision : En utilisant ce que vous avez pu observer à l'activité précédente, à votre avis, qu'allez-vous observer en regardant le ciel dans le spectroscope ?

Expérience : Dirigez la fente du spectroscope vers l'extérieur à travers la fenêtre pour observer le ciel qui diffuse la lumière du Soleil. -Attention, ne pas regarder directement le Soleil, cela est dangereux -

Simulation : Choisissez les objets tangibles de manière à reproduire sur la table la même expérience que celle réalisée précédemment. Réalisez cette expérience sur la table tactile. Vérifiez que vos observations et que ce que voit l'œil avec le spectroscope dans la simulation sur la table sont identiques.

a. Les séparations entre les lumières colorées du spectre sont-elles nettes ?

b. En utilisant vos crayons de couleurs, faites un dessin du spectre observé en respectant les différentes couleurs et la manière dont elles s'enchaînent.

Résultat : Votre prévision était-elle correcte ?

Conclusion : De quoi est composée la lumière blanche ?

Modélisation : Sur la table tactile, utilisez le cadre de modélisation. Recopiez le schéma sur votre cahier.

Pour aller plus loin :

Expérience : Dirigez la fente du spectroscope vers les sources de lumière (tubes « néon ») qui éclairent la salle

Simulation : En choisissant les objets tangibles correspondant, reproduisez cette expérience sur la table tactile. Comparez ce que vous avez observé avec le spectroscope et ce que voit l'œil dans la simulation sur la table.

Les séparations entre les lumières colorées du spectre sont-elles nettes

Autoévaluation des compétences

Dans cette activité, j'ai :	Je ne sais pas faire	Je ne sais pas encore bien faire	Je sais faire
Formulé une prévision			
Extrait des informations d'une expérience			
Utilisé correctement un objet technique en suivant un protocole			
Utilisé une simulation			
Validé ou invalidé une prévision			
Formulé une conclusion			
Utilisé une modélisation			

Activité 3a : Voir la vie en couleurs !

Philémon a fait un contrôle d'optique : voir la vie en couleurs :

Nom : *Philémon Bas* **Contrôle d'optique : voir la vie en couleurs ! (partie 1)**

Classe : *4ième 2*

1- Choisis le bon schéma qui correspond à ce qui se passe lorsqu'on regarde par la fenêtre au travers d'un objet transparent de couleur rouge et fais une phrase pour expliquer ce choix.

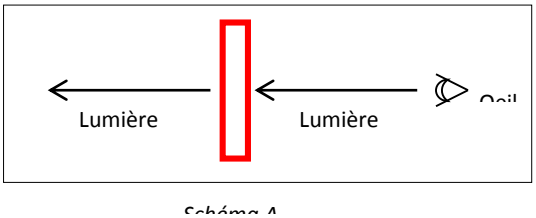


Schéma A

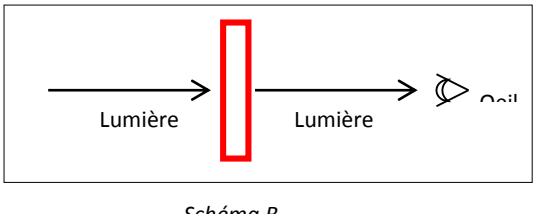


Schéma B

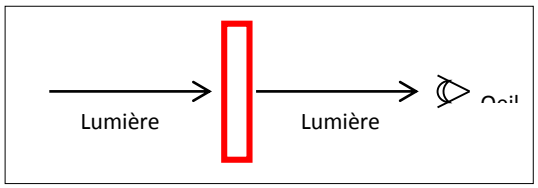


Schéma C

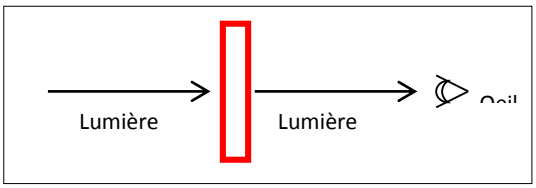


Schéma D

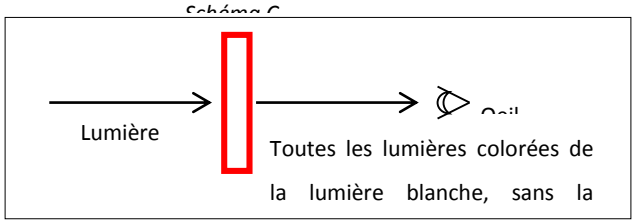


Schéma E

REPONSE : *Le schéma correct est le schéma D, car je vois rouge tout ce que j'observe à travers une pochette rouge.*

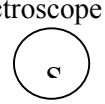
Première partie de l'activité

Question : A votre avis, la réponse de Philémon à la question 1 du contrôle est-elle correcte ?

Protocole : Vous avez à votre disposition : un spectroscope, une lanterne, un objet rouge transparent.

Les expériences seront réalisées dans l'obscurité. Faites un schéma pour montrer comment disposer le matériel pour valider ou infirmer la réponse de Philémon. On représentera les objets utilisés par les symboles suivants :

Le spectroscope la lanterne un objet transparent







Expérience : Après accord du professeur, réalisez votre expérience.

Observations : Notez vos observations

Résultats : Philémon avait – il raison à la question 1 ?

Conclusion :

Quelle est l'action d'un objet transparent rouge sur la lumière ?

Sélectionnez, dans le contrôle, la réponse qui correspond à votre conclusion.

Simulation : Choisissez les objets tangibles de manière à reproduire sur la table la même expérience que celle réalisée précédemment. Réalisez cette expérience sur la table tactile.

Comparez ce que vous avez observé avec le spectroscope et ce que l'œil voit dans la simulation sur la table pour différents objets transparents (rouge, vert, bleu)

Modélisation : Placez le cadre de modélisation sur la table tactile. Faites l'expérience avec un objet transparent, et comparez ce que l'œil voit et ce qui est affiché dans le cadre.
Faites une phrase pour expliquer ce qui est affiché dans la flèche après l'objet transparent.
Vous pouvez choisir d'autres objets transparents pour vous aider à formuler cette explication..
Conclusion : Quelle est l'action d'un objet transparent coloré sur la lumière ?

Autoévaluation des compétences

Dans cette activité, j'ai :	Je ne sais pas faire	Je ne sais pas encore bien faire	Je sais faire
Formulé une hypothèse			
Participé à la conception d'un protocole			
Suivi un protocole			
Extrait des informations d'une expérience			
Validé ou invalidé une hypothèse			
Formulé une conclusion			

Activité 3b : Voir la vie en couleurs !

Le contrôle d'optique de Philémon possède un second exercice :

Nom : *Philémon Bas* **Contrôle d'optique : voir la vie en couleurs ! (partie 2)**

Classe : *4ième 2*

2- Choisis le bon schéma qui correspond à ce qui se passe pour la lumière lorsqu'on observe un objet opaque de couleur rouge et fais une phrase pour expliquer ce choix.

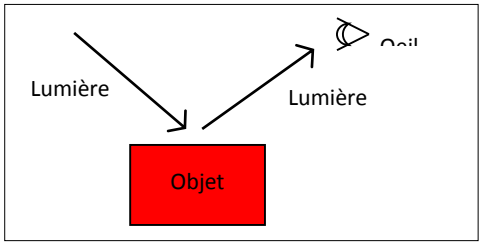


Schéma 1

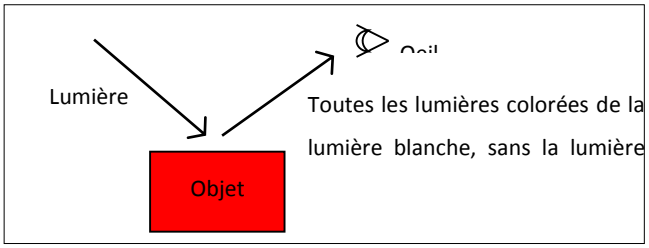


Schéma 2

REPONSE : *Le schéma correct est le schéma 2, car la lumière blanche qui arrive sur un objet rouge colore l'objet en rouge donc le rouge reste sur l'objet*

Seconde partie de l'activité

1 –Question : A votre avis, la réponse de Philémon à la question 2 du contrôle est-elle correcte ?
2 –Simulation : En utilisant les objets tangibles (source, objet opaque coloré, œil, spectroscope), faites l'expérience correspondant au schéma sur la table tactile pour un objet opaque rouge
Qu'observe l'œil à travers le spectroscope ?
Choisissez un objet opaque d'une autre couleur. Qu'observe l'œil à travers le spectroscope ?
4 –Modélisation : Placez le cadre de modélisation sur la table tactile. Faites l'expérience avec un objet opaque, et comparez ce que l'œil voit et ce qui est affiché dans le cadre.

Faites une phrase pour expliquer ce qui est affiché dans la flèche après l'objet opaque.
Vous pouvez choisir d'autres objets opaques pour vous aider à formuler cette explication.
5 –Résultats : Philémon avait – il raison à la question 2 ?
6 –Conclusion :
Quelle est l'action d'un objet opaque coloré sur la lumière ?
Sélectionnez, dans le contrôle, la réponse qui correspond à votre conclusion.
7 –Simulation : En utilisant les objets tangibles (source, objets opaques blanc et noir, œil, spectroscope), faites la même expérience avec un objet opaque blanc puis avec un objet opaque noir.
8 –Modélisation : Placez le cadre de modélisation sur la table tactile. Faites l'expérience avec les objets opaques noir et blanc, et comparez ce que l'œil voit et ce qui est affiché dans le cadre.
Faites une phrase pour expliquer ce qui est affiché dans la flèche après chaque objet opaque.
9 –Conclusion :
Quelle est l'action d'un objet opaque blanc sur la lumière ?
Quelle est l'action d'un objet opaque noir sur la lumière ?
10- Avec le matériel d'optique habituel (lanterne, spectroscope,…), vérifiez expérimentalement votre conclusion avec un objet blanc.

Autoévaluation des compétences

Dans cette activité, j'ai :	Je ne sais pas faire	Je ne sais pas encore bien faire	Je sais faire
Formulé une hypothèse			
Participé à la conception d'un protocole			
Suivi un protocole			
Extrait des informations d'une expérience			
Validé ou invalidé une hypothèse			
Formulé une conclusion			

Activité 4 : la magie des couleurs

Au mariage de la cousine de Cassiopée, il y a des dragées noires au chocolat et des dragées vertes aux amandes. Et quand vient l'heure du bal, la salle n'est éclairée qu'avec de la lumière rouge. Discrètement, Cassiopée prend une dragée, en pensant se régaler avec une dragée au chocolat, mais elle est très déçue, c'est une dragée aux amandes…

Elle aimerait bien comprendre comment elle a bien pu se tromper…

Prévision : A votre avis, comment expliquer que Cassiopée ait pu se tromper
Protocole : Avec le matériel à disposition (lanterne, objets…), proposez des expériences dont le résultat permettrait d'expliquer le problème rencontré par Cassiopée.
Expériences : Réalisez vos expériences
Observations : Notez vos observations
Résultat : Votre prévision était-elle exacte. Si ce n'est pas le cas, reprendre à la question 1.
Simulation : Choisissez les objets tangibles de manière à reproduire sur la table la même expérience que celle réalisée précédemment. Réalisez cette expérience sur la table tactile.
Comparez ce que vous avez observé et ce que l'œil voit dans la simulation sur la table

Modélisation : Placez le cadre de modélisation sur la table tactile de manière à afficher le schéma correspondant à votre expérience. Comparez ce que l'œil voit et ce qui est affiché dans le cadre.
Faites une phrase pour expliquer ce qui est affiché.
Vous pouvez choisir d'autres objets tangibles (couleur de la lumière et objets opaques) pour vous aider à formuler cette explication.
Conclusion : De quoi dépend la couleur des objets ?

Autoévaluation des compétences

Dans cette activité, j'ai :	Je ne sais pas faire	Je ne sais pas encore bien faire	Je sais faire
Formulé une prévision			
Participé à la conception d'un protocole			
Suivi un protocole			
Extrait des informations d'une expérience			
Validé ou invalidé une prévision			
Formulé une conclusion			

.

Cédric KNIBBE

Concevoir avec des technologies émergentes pour la construction conjointe des pratiques et des artefacts

Apports d'une méthodologie participative à l'innovation technologique et pédagogique

Résumé

Le numérique peut transformer profondément les pratiques pédagogiques. Pour cela, il doit cependant à la fois s'y intégrer et être porteur d'innovations potentielles. Cette thèse porte sur les facteurs de conception permettant d'articuler ces enjeux lors de la conception d'une application tangible sur table interactive. Elle s'intéresse aux facteurs suivants : la co-construction de l'application tangible conjointement aux pratiques enseignantes ; l'implication de futurs utilisateurs ; la confrontation de leurs hypothèses de conception ; et le cadrage du champ des possibles. Les résultats montrent que ces facteurs participent conjointement à l'articulation entre innovation et intégration autour de quatre sous-enjeux : l'adaptation de l'application tangible aux besoins des enseignants ; l'adaptation de leurs pratiques aux caractéristiques des tables interactives ; l'exploitation du potentiel de ces technologies ; et l'amélioration des pratiques enseignantes.

Mots-clés : Conception participative, Innovation, TICE, Technologie émergente, Tables interactives, Interfaces tangibles

Résumé en anglais

Information and Communication Technologies can deeply transform pedagogical practices. To achieve this, it must however both integrate these practices and foster potential innovations. This thesis concerns the design allowing these issues to be articulated when designing a tangible application on interactive tables. It addresses the following factors: the co-construction of the tangible application jointly to teaching practices; the involvement of future users; the confrontation of their design assumptions; and the framing of the field of possibilities. Results show that these factors jointly contribute to innovation and integration through four sub-issues: the adaptation of the tangible application to the needs of teachers, the adaptation of their practices to the characteristics of interactive tables, the use of the potential of these technologies and the improvement of teaching practices.

Keywords: Participatory design, Innovation, Education technologies, Emerging technologies, Interactive tabletops, Tangible User Interfaces