

Université de Montréal

**Élaboration d'un environnement d'expérimentation
en simulation incluant un cadre théorique pour
l'apprentissage de l'énergie des fluides**

**par
Daniel Cervera**

**Département de didactique
Faculté des sciences de l'éducation**

**Thèse présentée à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de
Philosophiae Doctor (Ph. D.) en didactique**

Octobre 1997

© Daniel Cervera, 1997



Identification du jury

**Université de Montréal
Faculté des études supérieures**

Cette thèse intitulée :

**Élaboration d'un environnement d'expérimentation
en simulation incluant un cadre théorique pour
l'apprentissage de l'énergie des fluides**

**présentée par
Daniel Cervera**

a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes :

Mme Gisèle Lemoyne	Président-rapporteur
M. Pierre Nonnon	Directeur de recherche
M. Max Giardina	Membre du jury
M. Pascal Leroux	Examineur externe
M. Alain Vincent	Représentant du doyen de la FÉS
Thèse acceptée le :	29.06- 1998

SOMMAIRE

Dans cette thèse, nous présentons la démarche et les diverses étapes qui nous ont conduits à l'élaboration d'un environnement d'expérimentation en simulation assistée par ordinateur, incluant un cadre théorique, susceptible d'améliorer l'apprentissage des concepts reliés aux phénomènes qui se produisent dans les systèmes technologiques fermés impliquant des fluides (gaz et liquides), tels les systèmes hydrauliques et pneumatiques industriels, les systèmes de réfrigération, de climatisation et de chauffage. Ces phénomènes ne sont pas directement observables et leur évolution obéit aux interactions complexes qui se produisent à l'intérieur des systèmes, ce qui leur confère un caractère particulièrement abstrait et difficile à comprendre.

Notre démarche a consisté à concevoir cet environnement d'apprentissage à partir d'une situation problématique qui se caractérise notamment par la présence de fausses représentations conceptuelles chez les étudiants et par la complexité des phénomènes impliqués dans les systèmes en question.

Nous avons conceptualisé un environnement d'apprentissage interactif d'inspiration essentiellement constructiviste, basé sur l'expérimentation et la modélisation didactique et qui permet à l'étudiant d'observer simultanément et en temps réel le comportement des systèmes et l'évolution des variables au moyen de graphiques. Aussi, nous avons élaboré un cadre théorique pour l'apprentissage de l'énergie des fluides, de nature semblable à celui qui existe pour les circuits électriques. Ce cadre théorique explicite les règles qui sous-tendent la manière dont les fluides se distribuent dans les circuits et permet d'articuler une analyse du comportement des systèmes.

Nous avons réalisé deux prototypes de l'environnement d'apprentissage. Le premier a permis de vérifier la faisabilité technologique et l'intérêt didactique des principales orientations du projet. Le deuxième prototype a été conçu et réalisé dans le cadre d'une entente de partenariat de type industriel avec deux autres co-auteurs. Nous avons effectué les mises à l'essai fonctionnelle et empirique des prototypes selon la démarche du modèle de recherche-développement technologique en éducation de Nonnon. Les résultats de ces mises à l'essai indiquent que l'environnement d'apprentissage illustre le comportement des systèmes selon un degré de fidélité technologique suffisamment proche de celui des systèmes réels, en plus d'offrir les avantages propres à la simulation assistée par ordinateur, c'est-à-dire notamment la possibilité de créer des situations et de les expérimenter, d'en faire varier les paramètres, d'illustrer les phénomènes cachés et d'observer simultanément et en temps réel le comportement des systèmes et l'évolution des graphiques des variables.

Les caractéristiques technologiques qui découlent des techniques avancées de modélisation utilisées pour la réalisation du deuxième prototype, confèrent à l'environnement d'apprentissage des capacités reliées à la conception de systèmes et au diagnostic de pannes en milieu industriel. Cet aspect, que nous n'avons pas poursuivi spécifiquement au plan didactique, constitue, selon nous, un sérieux indice de sa valeur en tant que milieu d'étude représentatif des systèmes réels.

Descripteurs :

Simulation assistée par ordinateur, modélisation didactique, énergie des fluides, hydraulique, pneumatique, cadre théorique.

TABLE DES MATIÈRES

<u>INTRODUCTION</u>	1
PRÉSENTATION	2
<u>CHAPITRE I : LA PROBLÉMATIQUE</u>	
1. INTRODUCTION	8
2. LA PROBLÉMATIQUE	8
2.1. PERSPECTIVE ÉPISTÉMOLOGIQUE	9
2.2. LES FAUSSES REPRÉSENTATIONS CONCEPTUELLES DES ÉTUDIANTS	10
<u>CHAPITRE II : L'IDÉE DE DÉPART ET LES OBJECTIFS DE RECHERCHE</u>	16
1. INTRODUCTION	17
2. L'IDÉE DE DÉVELOPPEMENT D'UN SYSTÈME D'APPRENTISSAGE	17
3. LES OBJECTIFS DE RECHERCHE	17
<u>CHAPITRE III : MÉTHODOLOGIE : LE MODÈLE DE RECHERCHE-DÉVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE</u>	21
1. LA MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE	22
2. LE MODÈLE DE RECHERCHE-DÉVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE DE NONNON	22
3. LES FONDEMENTS DU MODÈLE DE NONNON	23
4. JUSTIFICATION DE L'ADOPTION DU MODÈLE DE NONNON	24
<u>CHAPITRE IV : CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES</u>	26
1. INTRODUCTION	27
2. LE PHÉNOMÈNE DES REPRÉSENTATIONS CONCEPTUELLES	27
2.1. INTRODUCTION	27
2.2. LE CONCEPT DIDACTIQUE DE REPRÉSENTATION	28
2.3. LES DIVERS TYPES DE REPRÉSENTATION	29
2.4. CARACTÉRISTIQUES DES REPRÉSENTATIONS CONCEPTUELLES	31
2.4.1. CARACTÈRE CORIACE DES REPRÉSENTATIONS SPONTANÉES	33
2.4.2. COEXISTENCE DE NIVEAUX MULTIPLES : PHÉNOMÈNE DE «PLACAGE»	34
2.4.3. FONDEMENT SENSORIEL DES REPRÉSENTATIONS SPONTANÉES	35
2.5. AMPLEUR DU PHÉNOMÈNE	37
2.6. MOYENS ET MÉTHODES POUR IDENTIFIER LES FAUSSES REPRÉSENTATIONS	38
2.7. EXEMPLES DE FAUSSES REPRÉSENTATIONS CONCEPTUELLES ET DE LEURS IMPLICATIONS DIDACTIQUES	42
2.7.1. QUELQUES REPRÉSENTATIONS CONCEPTUELLES EN DYNAMIQUE	42
REPRÉSENTATION ANIMISTE DU CONCEPT DE FORCE	42

REPRÉSENTATION ARISTOTÉLICIEUNE DU MOUVEMENT	43
2.7.2. QUELQUES REPRÉSENTATIONS DES ÉLÈVES SUR L'ÉNERGIE, LA CHALEUR ET LA TEMPÉRATURE	44
2.7.3. QUELQUES REPRÉSENTATIONS DES ÉLÈVES EN GÉNÉTIQUE, EN IMMUNOLOGIE ET EN PHYSIOLOGIE	45
2.7.4. QUELQUES REPRÉSENTATIONS DES ÉTUDIANTS EN ÉLECTRICITÉ	46
LE MODÈLE DES COURANTS ANTAGONISTES	46
LE MODÈLE DU COURANT QUI «S'ÉPUISE»	47
2.8. IMPORTANCE DE TENIR COMPTE DES FAUSSES REPRÉSENTATIONS DANS LES ACTIVITÉS D'APPRENTISSAGE	47
2.9. CONCLUSION	48
3. LE MODÈLE CONSTRUCTIVISTE DE L'APPRENTISSAGE	49
3.1 LE CONFLIT CONCEPTUEL	51
3.2. L'APPROCHE D'EXPÉRIMENTATION ET DE MODÉLISATION EN SIMULATION	54
3.3. L'APPROCHE SYSTÉMIQUE	56
3.4. LA SIMULATION ASSISTÉE PAR ORDINATEUR	62
CHAPITRE V : OPÉRATIONNALISATION DE L'IDÉE : ÉLABORATION D'UN MODÈLE D'ACTION PÉDAGOGIQUE	67
1. INTRODUCTION	68
2. NATURE DE L'ENVIRONNEMENT D'APPRENTISSAGE	68
3. BUT POURSUIVI	69
4. POPULATION ET COURS VISÉS	70
5. PLATE-FORME DE DÉVELOPPEMENT	70
6. SYSTÈME D'UNITÉS	71
7. TÂCHES, PHÉNOMÈNES ET CONCEPTS IMPLIQUÉS	71
8. LES FONCTIONS GÉNÉRALES DE L'ENVIRONNEMENT D'APPRENTISSAGE	72
8.1. LE SIMULATEUR	72
8.2. LA BANQUE DE LEÇONS ET DE SITUATIONS EXPÉRIMENTALES	73
9. LES FONCTIONS DE REPRÉSENTATION DU SIMULATEUR	73
10. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DU SIMULATEUR	75
10.1. CONDUITS INCORPORÉS DANS LES COMPOSANTS	75
10.2. RACCORDEMENTS AUTOMATIQUES DES APPAREILS DE MESURE	76
10.3. CODE DE COULEURS	76
10.4. COMPOSANTS «ALTÉRÉS»	77
10.5. SIMULATIONS EN TEMPS RÉEL	78
10.6. GRAPHEUR ET CHRONOGRAMME	79

11. EXEMPLE D'UN SYSTÈME REPRÉSENTATIF DES PRINCIPALES FONCTIONS À SIMULER	80
11.1. DESCRIPTION DU FONCTIONNEMENT DU SYSTÈME	81
11.2. DESCRIPTION DES ANIMATIONS À RÉALISER	83
<u>CHAPITRE VI</u> : RÉALISATION DU PROTOTYPE DE L'ENVIRONNEMENT D'APPRENTISSAGE INFORMATISÉ	87
1. INTRODUCTION	88
2. RÉALISATION DU PREMIER PROTOTYPE	89
3. RÉALISATION DU DEUXIÈME PROTOTYPE	90
4. ADOPTION DE HYDRO+PNEU [©] POUR LA SUITE DES TRAVAUX	91
<u>CHAPITRE VII</u> : L'ÉLABORATION D'UN CADRE THÉORIQUE EN ÉNERGIE DES FLUIDES	93
1. INTRODUCTION	94
2. PERSPECTIVE ÉPISTÉMOLOGIQUE	95
3. ÉLABORATION D'UN CADRE THÉORIQUE EN ÉNERGIE DES FLUIDES	98
3.1. LES RÈGLES DE L'ÉCOULEMENT DES FLUIDES	98
3.2. LA FONCTION D'UN SYSTÈME D'ÉNERGIE DES FLUIDES	106
3.3. LA STRUCTURE FONCTIONNELLE D'UN SYSTÈME D'ÉNERGIE DES FLUIDES	108
3.4. LE PRINCIPE DE RÉVERSIBILITÉ DES COMPOSANTS ET DES SYSTÈMES	109
3.5. ANALYSE DU COMPORTEMENT DES SYSTÈMES : APPROCHE BASÉE SUR LES VASES COMMUNICANTS	113
3.6. LA MORPHOLOGIE DES CIRCUITS	117
3.7. L'ALGORITHME	118
4. CONCLUSION	119
<u>CHAPITRE VIII</u> : LES MISES À L'ESSAI DU PROTOTYPE	121
1. LES MISES À L'ESSAI DU PROTOTYPE	122
2. LA MISE À L'ESSAI FONCTIONNELLE	123
2.1. LA MISE À L'ESSAI FONCTIONNELLE DU PREMIER PROTOTYPE	123
2.2. LA MISE À L'ESSAI FONCTIONNELLE DES SITUATIONS EXPÉRIMENTALES D'APPRENTISSAGE ÉLABORÉES AVEC HYDRO+PNEU [©]	129
3. LA MISE À L'ESSAI EMPIRIQUE	132
3.1. LA MISE À L'ESSAI EMPIRIQUE DU PREMIER PROTOTYPE	134
3.2. LA MISE À L'ESSAI EMPIRIQUE DES SITUATIONS D'APPRENTISSAGE	135
<u>CHAPITRE IX</u> : CONCLUSION GÉNÉRALE	139
CONCLUSION GÉNÉRALE	140
BIBLIOGRAPHIE	146

ANNEXE I : NATURE DES TÂCHES GÉNÉRALEMENT DÉVOLUES AUX TECHNICIENS DE L'ORDRE COLLÉGIAL	i
ANNEXE II : DOCUMENT PRÉPARATOIRE À LA RENCONTRE D'ÉVALUATION DES ORIENTATIONS DU LOGICIEL HYDRO-PNEU	viii
ANNEXE III : SITUATIONS D'APPRENTISSAGE DÉVELOPPÉES AVEC LE LOGICIEL HYDRO+PNEU®	xxvi

LISTE DES TABLEAUX

- | | | |
|-----|--------------|--|
| I | Chapitre I | Étude comparative des représentations conceptuelles des étudiants et celles des scientifiques à l'égard des concepts de débit, pression et vide. |
| II | Chapitre IV | Caractéristiques des représentations personnelles et des représentations scientifiques. |
| III | Chapitre IV | Représentations des élèves sur l'énergie, la chaleur et la température. |
| IV | Chapitre IV | Différences entre l'approche systémique et la méthode scientifique. |
| V | Chapitre VII | Comparaison entre les caractéristiques des technologies électrique et hydraulique. |

LISTE DES FIGURES

- 1 Chapitre III Modèle de recherche-développement technologique en éducation de Nonnon.
- 2 Chapitre IV Le modèle constructiviste du phénomène de l'apprentissage
- 3 Chapitre IV Exemple d'application du schéma fonctionnel de Peterfalvi.
- 4 Chapitre V Exemple d'un système représentatif des principales fonctions à simuler.
- 5 Chapitre VII Vases communicants : situation instable.
- 6 Chapitre VII Vases communicants : situation stable.
- 7 Chapitre VII Écoulement des liquides dans les vases communicants.
- 8 Chapitre VII Vases communicants avec restriction. Cas 1.
- 9 Chapitre VII Vases communicants avec restriction. Cas 2
- 10 Chapitre VII Liens entre les lois fondamentales et les règles d'écoulement des fluides.
- 11 Chapitre VII Structure générale d'un système d'énergie des fluides.
- 12 Chapitre VII Système hydraulique simple.
- 13 Chapitre VII Système de vases communicants équivalent.
- 14 Chapitre VII Système de vases communicants équivalent : phase 1.
- 15 Chapitre VII Système de vases communicants équivalent : phase 2.
- 16 Chapitre VII Système de vases communicants équivalent : phase 3.

REMERCIEMENTS

L'auteur désire exprimer sa plus grande reconnaissance à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

En tout premier lieu, j'adresse un merci particulier à Pierre Nonnon, mon directeur de thèse. D'abord, il a cru à l'intérêt de ce travail, alors qu'il était à un stade embryonnaire ; ensuite, tout au long du cheminement, il m'a proposé des orientations, des idées et des approches qui ont contribué à améliorer de manière significative le résultat final de ce travail. Mais il m'a surtout laissé toute la liberté d'adhérer ou non à ses propositions... Je pense que j'en suis venu à partager l'essentiel de sa vision de l'enseignement et de l'apprentissage. Un très grand merci et le témoignage de ma profonde reconnaissance et amitié.

Je dois aussi une grande reconnaissance à Pascal Bigras et à Tony Wong qui, à titre de partenaires sur les droits de commercialisation de l'environnement d'apprentissage, ont conçu des approches de modélisation et développé des algorithmes qui lui confèrent des aptitudes particulièrement performantes au point de vue didactique et industriel.

Je veux aussi exprimer ma reconnaissance à tous ceux qui ont contribué, d'une manière ou d'une autre, à la validation des orientations de ce projet et aux mises à l'essai des diverses versions du prototype. Plus particulièrement, je m'adresse aux professeurs Germain Daoust du Collège de Valleyfield ; Réjean Labonville et Ahmed Daoud de l'École polytechnique de Montréal ; Jocelyn Gagnon du Collège de Trois-Rivières ; François Lamy du Collège de Saint-Laurent et Daniel Tremblay du Collège du Vieux-Montréal.

Enfin, je dois un merci particulier à tous les étudiants, fort nombreux, jeunes et adultes, du Collège de Valleyfield qui se sont prêtés de bonne grâce aux multiples séances d'entrevues cliniques lors des mises à l'essai des diverses versions des prototypes.

INTRODUCTION

PRÉSENTATION

Dans cette thèse, l'auteur s'intéresse à l'élaboration d'un environnement informatisé pour l'apprentissage de systèmes technologiques impliquant des phénomènes non observables, plus particulièrement, des systèmes comportant des fluides (liquides et gaz) comme les systèmes hydrauliques et pneumatiques de transmission de puissance, communément appelés systèmes d'énergie des fluides, et les systèmes de réfrigération et chauffage.

La situation problématique qui suscite notre démarche est centrée sur les difficultés qu'éprouvent les étudiants à apprendre les concepts qui sous-tendent les phénomènes qui se produisent dans les systèmes évoqués. La plupart de ces phénomènes ne sont pas directement observables et leur déroulement obéit aux interactions qui s'exercent à l'intérieur de ces systèmes, ce qui leur confère un caractère abstrait et complexe. Cette situation expliquerait, selon nous, que même à la fin de leur formation, les étudiants conservent de fausses représentations sur des concepts centraux de la discipline. Nous présenterons au chapitre I, LA PROBLÉMATIQUE, les considérations qui entourent les difficultés d'apprentissage des étudiants et nos travaux visant à caractériser leurs fausses représentations. Nous préciserons aussi la problématique générale à laquelle notre idée de développement se propose d'apporter une contribution.

Dans le but de faciliter les apprentissages, nous avons articulé une idée de développement technologique consistant à créer un environnement d'apprentissage informatisé, une sorte de laboratoire virtuel d'expérimentation, permettant de rendre observables les phénomènes qui se produisent dans les systèmes, au moyen de situations expérimentales réalisées en simulation assistée par ordinateur, et de les rendre intelligibles à l'aide de modèles explicatifs interactifs qui illustreront les relations entre les variables. Notre objectif didactique consiste à

fournir à l'étudiant un laboratoire virtuel afin qu'il puisse créer et configurer des situations expérimentales, modifier celles qui lui seront proposées, les mettre à l'essai et explorer toutes les hypothèses de fonctionnement qu'il désire. Nous voulons placer l'étudiant dans une situation dynamique de résolution de problèmes pour l'inciter à interagir avec les situations, à se poser des questions, à les expérimenter et à formuler des réponses. Cette démarche sera fondée essentiellement sur le paradigme constructiviste et interactionniste de l'apprentissage et visera à favoriser la construction des connaissances de l'étudiant et à faire évoluer ses représentations conceptuelles. Nous présenterons plus amplement, au chapitre II, L'IDÉE DE DÉPART ET LES OBJECTIFS DE RECHERCHE, les intentions que nous poursuivons dans le cadre de cette recherche.

Pour opérationnaliser notre démarche, nous avons adopté le modèle de recherche développement technologique en éducation de Nonnon (1987) ; ce modèle prévoit une démarche qui, tout en garantissant les critères de rigueur scientifique, réserve une place importante au processus de créativité, ce qui nous paraît essentiel dans le cadre de l'élaboration d'un projet qui met à contribution des aspects technologiques encore peu développés au plan didactique. Au chapitre III, MÉTHODOLOGIE : LE MODÈLE DE RECHERCHE-DÉVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE, nous exposerons les fondements et les étapes du modèle de recherche développement technologique en éducation de Nonnon. Nous y élaborerons aussi les raisons qui justifient l'adoption de ce modèle.

Nous avons articulé notre idée de départ à la lumière de considérations d'ordre théorique. Ainsi, dans un premier temps, nous réaliserons une analyse conceptuelle de la discipline consistant à expliciter l'ensemble des phénomènes qui se produisent dans les systèmes en question, à préciser les concepts qui les sous-tendent et à définir les fonctionnalités technologiques selon une perspective systémique de modélisation. Dans un deuxième temps,

nous identifierons les difficultés d'apprentissage des étudiants ; nous aborderons le phénomène des représentations conceptuelles à la lumière des théories cognitivistes et particulièrement du paradigme constructiviste de l'apprentissage et du modèle du conflit cognitif ; nous mettrons en lumière et caractériserons un certain nombre de fausses représentations conceptuelles des étudiants à l'égard des concepts centraux de la discipline. Nous prendrons aussi en considération les conditions qui doivent concourir pour optimiser les apprentissages dans un environnement d'expérimentation en simulation assistée par ordinateur. L'ensemble de ces aspects sera présenté au chapitre IV, CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES.

L'étape suivante consistera à élaborer un modèle permettant d'opérationnaliser l'idée de départ. Ce modèle prendra une forme analogue à celle d'un devis pédagogique et d'un cahier des charges définissant l'environnement d'apprentissage que nous voulons créer ; il en précisera les fonctions et les caractéristiques pédagogiques et technologiques, les phénomènes dont il devra rendre compte et la manière de les représenter, le contexte pressenti d'utilisation en classe, ainsi que les modes d'interaction étudiant-ordinateur. Nous exposerons ce modèle d'action au chapitre V, OPÉRATIONNALISATION DE L'IDÉE : ÉLABORATION D'UN MODÈLE D'ACTION PÉDAGOGIQUE.

L'étape suivante consistera à rendre opérationnel le modèle d'action, c'est-à-dire à concrétiser le prototype de l'environnement d'apprentissage projeté. Ce prototype se présentera sous la forme d'un didacticiel de simulation permettant de supporter une démarche d'apprentissage selon une approche systémique de modélisation didactique. Cet environnement permettra notamment d'élaborer des systèmes complets, de les expérimenter et d'observer leur comportement et les phénomènes qui s'y produisent, simultanément avec l'illustration graphique des interactions qui s'exercent entre les variables.

Cependant, afin de circonscrire et de limiter notre domaine de recherche, nous travaillerons plus spécifiquement sur les systèmes d'énergie des fluides de type industriel, soit des systèmes hydrauliques et pneumatiques. Ce domaine est suffisamment vaste et complexe pour supporter une application complète de notre approche.

Au chapitre VI, RÉALISATION DU PROTOTYPE DE L'ENVIRONNEMENT D'APPRENTISSAGE INFORMATISÉ, nous présenterons notre démarche visant à réaliser les divers prototypes de cet environnement et les résultats obtenus. Aussi, à l'annexe III nous présenterons un ensemble de situations d'apprentissage élaborées avec cet environnement, incluant une description succincte des systèmes qu'il permet de simuler, des phénomènes impliqués et du traitement qui en est fait. Ces situations font partie de la banque d'exercices expérimentaux incluse dans le didacticiel de simulation.

À partir des considérations théoriques évoquées précédemment, mais plus particulièrement lors de notre démarche visant à expliciter le comportement des systèmes durant les simulations, nous avons constaté l'existence d'un vide épistémologique important dans la discipline, soit l'absence d'un cadre théorique permettant d'explicitier, de manière suffisamment complète et cohérente, l'ensemble des lois et règles qui sous-tendent ce comportement. Nous élaborerons ce cadre théorique «manquant», ce qui constituera, selon nous, la principale contribution théorique de cette recherche à la didactique de la discipline. Nous en présenterons les divers aspects et fondements au chapitre VII, L'ÉLABORATION D'UN CADRE THÉORIQUE EN ÉNERGIE DES FLUIDES .

Par la suite, nous procéderons à deux mises à l'essai, préalables à la validation pédagogique systématique, de l'environnement d'apprentissage et des situations expérimentales. La première de ces mises à l'essai, à caractère essentiellement fonctionnel, sera réalisée

auprès d'enseignants et d'experts industriels de la discipline. Elle aura pour objectif de vérifier l'exactitude des aspects théoriques abordés, ainsi que la pertinence du traitement qui en sera fait et de la manière dont l'environnement d'apprentissage rendra compte des situations mises à contribution. La deuxième mise à l'essai aura pour objectif d'analyser les interactions entre les étudiants et les situations expérimentales proposées, de vérifier l'intérêt suscité par cet environnement d'apprentissage, d'observer l'utilisation qu'en feront les étudiants, d'identifier les apports qu'il constituera, ainsi que de mesurer, de manière empirique, son incidence sur les apprentissages réalisés. Les résultats de ces mises à l'essai seront réinvestis pour améliorer le prototype. Nous présenterons la démarche de ces deux mises à l'essai et les résultats obtenus au chapitre VIII, LES MISES À L'ESSAI DU PROTOTYPE.

Enfin, nous élaborerons les conclusions de l'ensemble de notre démarche et ferons état des limites de notre recherche. Dans une perspective prospective, nous aborderons aussi quelques orientations qu'il serait opportun d'envisager lors de développements futurs. Ces aspects feront l'objet du chapitre IX, CONCLUSIONS.

CHAPITRE I

LA PROBLÉMATIQUE

1. INTRODUCTION

Nous abordons ici la question de la problématique qui est à l'origine de l'idée de développement technologique qui fait l'objet de cette thèse.

Un des problèmes les plus importants auxquels fait face la formation professionnelle est celui des difficultés d'apprentissage qu'éprouvent les étudiants à l'égard des concepts techno-scientifiques. Au Québec, de nombreux ouvrages et études (Labonté, 1986 ; Nonnon, 1986 ; Actes 1986, 1988, 1989, 1990 et 1991 ; Larrochelle et Désautels, 1992) insistent sur l'importance d'une formation techno-scientifique de qualité. Or, presque sans exception, ces mêmes études font ressortir les difficultés des étudiants face à cette formation et à leur manque d'intérêt généralisé pour les matières à incidence scientifique. Les causes de cette situation seraient imputables à l'absence d'une véritable didactique techno-scientifique, ce qui se traduit trop souvent par un enseignement qui fait appel à des recettes, des formules et des modes opératoires, prétendument fonctionnels, mais qui n'expliquent ni les raisons ni les causes des situations observées, ni les phénomènes mis en cause. Ainsi, les étudiants développent des savoirs-faire empiriques avec lesquels ils peuvent réussir leur cheminement scolaire sans nécessairement avoir assimilé l'essentiel des concepts mis à contribution.

2. LA PROBLÉMATIQUE

Notre attention se porte particulièrement sur les difficultés d'apprentissage qu'éprouvent les étudiants avec les phénomènes physiques qui se produisent dans les systèmes fermés impliquant des fluides, notamment les systèmes d'énergie des fluides industriels (hydraulique et pneumatique), les systèmes de réfrigération et les systèmes de climatisation et de chauffage ; la plupart de ces phénomènes ne sont pas directement ob-

servables et leur déroulement obéit aux interactions qui se produisent à l'intérieur même des systèmes, ce qui leur confère un caractère particulièrement abstrait et complexe. Nos travaux à ce sujet (Cervera et Métioui, 1993) démontrent que ces difficultés d'apprentissage sont caractérisées notamment par le fait que les étudiants ne parviennent pas à expliquer ou à résoudre des problèmes et situations simples, qui n'exigent aucun calcul, mais plutôt une description qualitative des phénomènes. Ils n'arrivent pas à établir de relation entre la situation, les phénomènes et les concepts impliqués.

2.1. PERSPECTIVE ÉPISTÉMOLOGIQUE

Du point de vue épistémologique, un simple survol des manuels d'hydraulique et de pneumatique permet de remarquer que la plupart d'entre eux font état des principales lois qui concernent ces domaines, comme les lois de Pascal, de Bernouilli, de la compressibilité des gaz, etc. Cependant, l'apprentissage de ces lois n'est pas réinvesti ; elles sont présentées comme allant de soi, de manière détachée et sans liens épistémologiques avec le reste des contenus ; l'étudiant doit en deviner la portée, le champ de validité et le contexte d'application ; il doit aussi les intégrer et discerner celles qui sont susceptibles de s'appliquer dans tel ou tel cas particulier. Également, dans les manuels, l'étude des systèmes se fait à partir de cas élémentaires, présentant chacun une fonction technologique qui est matérialisée par un composant particulier (voir à titre d'exemple : Pippinger, 1959 ; Stewart, 1963 ; Wolansky et al., 1977 ; Rexroth, 1981 ; Remy, 1982 ; Labonville, 1991 ; Fayet, 1991) ; les situations plus complexes sont abordées par le simple cumul de fonctions élémentaires. Or, cette approche s'avère rapidement incapable de rendre compte des interactions qui s'exercent entre les divers composants du système car elle ne favorise pas une vision d'ensemble. Ainsi, l'étude d'un système quelque peu complexe se fait sans aucun référentiel général permettant d'articuler une analyse cohérente et structurée ; seule l'expérience —

dit-on— permet de dépasser ces difficultés. On arrive rapidement à penser que seul un expert dans le domaine peut anticiper le comportement de tels systèmes et que l'enseignement ne peut que se limiter à une étude isolée de chaque cas. Nous croyons que cette situation est, en bonne partie, inhérente à l'approche d'enseignement traditionnel de l'énergie des fluides, laquelle est essentiellement basée sur l'étude du fonctionnement des composants, par opposition à une approche systémique qui serait basée sur l'étude des fonctions des systèmes proprement dits. Au chapitre IV traitant des considérations théoriques, nous développerons plus avant cette question de l'approche systémique.

2.2. LES FAUSSES REPRÉSENTATIONS CONCEPTUELLES DES ÉTUDIANTS

Nous abordons ici la question des fausses représentations conceptuelles des étudiants. Ce sujet fera l'objet d'un développement théorique au chapitre IV. Nous nous limiterons ici à exposer les résultats de quelques travaux visant à caractériser les fausses représentations. Dans le domaine de l'hydraulique, ces travaux sont beaucoup moins abondants que dans d'autres disciplines telles que la cinématique, l'électricité ou la biologie. Quelques auteurs ont exploré les représentations des étudiants sur la notion de débit et de pression, particulièrement en raison de leur utilisation fréquente comme analogie pour expliquer les concepts plus abstraits de courant et de tension électrique.

Parmi les premiers, Bachelard (1938), cité par Astolfi (1992), avait exploré les représentations entourant le principe d'Archimède :

« L'équilibre des corps flottants fait l'objet d'une intuition familière qui est un tissu d'erreurs. D'une manière plus ou moins nette, on attribue une activité au corps qui flotte, mieux au corps qui nage. Si on essaie d'enfoncer un morceau de bois dans l'eau, il résiste. On n'attribue pas facilement la résistance à l'eau. Il est dès lors difficile de faire comprendre le principe d'Archimède, dans son étonnante simplicité mathématique, si l'on n'a pas d'abord critiqué et désorganisé le complexe impur des impressions premières » (p. 81).

Plus récemment, Blondin et al. (1992), s'intéressent aux raisonnements des étudiants face aux circuits simples d'hydrodynamique. Plusieurs d'entre eux estiment que le débit d'un liquide est plus faible dans un rétrécissement qu'en amont ou en aval de celui-ci : ainsi, le rétrécissement serait le lieu d'une diminution purement locale du débit. Pour d'autres étudiants, le rétrécissement s'accompagne également d'une réduction du débit mais ce dernier conserve ensuite cette valeur réduite. D'autres estiment que le débit est plus élevé dans le rétrécissement. Par ailleurs, les auteurs constatent « *une sorte de contamination, non exceptionnelle, entre les notions de débit et de vitesse : ainsi un sujet explique que pour que la quantité d'eau par seconde reste constante, le débit doit accélérer.* » De plus, Closset (1992), cosignataire du texte précédent, remarque les mêmes tendances en électricité et en hydrodynamique chez les étudiants de 18 ans : les types de raisonnement sont qualitativement semblables. En ce qui concerne le concept de débit, il note l'existence d'un raisonnement selon lequel il n'y a pas de conservation du flux de liquide lorsque celui-ci traverse un rétrécissement. Il constate aussi que « *penser qu'une différence de pression est nécessaire pour obtenir un débit est exceptionnel* ».

De leur côté, Kariotogloy et al. (1993) résument ainsi les résultats de quelques travaux récents :

« *Some pupils ignore the incompressibility of liquids, or consider that they do not have constant volume* ».

« *Many pupils find it difficult to understand the concept of pressure, which they confuse with force. Moreover, they attribute vector features to pressure and consider it to be an extensive quantity like force* ».

« *Physical phenomena involving equilibrium and movement, like sucking orange juice from a carton, are interpreted in terms of "pressure" and / or "force" rather than in terms of pressure difference* ».

En ce qui nous concerne, dans Youssef et al. (1991), nous avons exploré notamment les concepts de pression et de débit dans une perspective proche de l'enseignement tech-

nique de l'énergie des fluides. Voici en quels termes nous avons formulé quelques-unes des représentations des étudiants. Les exemples sont tirés de Cervera et al. (1991). Précisons que, pour un lecteur non initié à l'énergie des fluides, ces formulations peuvent paraître logiques, à première vue ; cependant, elles sont inexactes ou fausses. Nous avons ajouté les insertions en caractères gras pour en faciliter la compréhension.

*« La pression est une entité matérielle en soi (**faux**). Elle est produite par une pompe (**faux**). On peut la faire circuler, la manipuler, la renvoyer au réservoir ou encore l'utiliser pour faire avancer un vérin (**faux**). La pression est fonction de la vitesse d'écoulement du liquide (**partiellement vrai**). Plus le conduit est petit, plus la vitesse sera grande, et plus la pression augmentera (**partiellement vrai**). La force d'un vérin dépendra donc de la grosseur du conduit (**faux**) ».*

*« Le vide n'est qu'une pression de valeur négative ($P=F/S$) (**partiellement vrai**). Il peut donc atteindre une valeur négative quelconque, tout dépendant de la force et de la surface (**faux**). (Il n'est donc pas limité à la valeur de la pression atmosphérique, soit 1,013 bar) (**faux**) ».*

Bien entendu, ces formulations ne se retrouvent pas directement dans les réponses des étudiants. Elles constituent une synthèse qui sous-tend certains types de raisonnement observés, c'est-à-dire qu'elles semblent faire partie des assises épistémologiques sur lesquelles les étudiants basent leurs raisonnements.

Dans un article de synthèse (Cervera et al, en rédaction), nous avons caractérisé les fausses représentations suivantes (Tableau I) à l'égard des concepts de débit, pression et vide, chez les étudiants du programme *Techniques de génie mécanique* de l'ordre collégial, après qu'ils ont complété une formation formelle dans le domaine.

TABLEAU I

**ÉTUDE COMPARATIVE DES REPRÉSENTATIONS CONCEPTUELLES DES ÉTUDIANTS
ET CELLES DES SCIENTIFIQUES À L'ÉGARD DES CONCEPTS DE DÉBIT, PRESSION ET VIDE**

REPRÉSENTATION ERRONÉE DES ÉTUDIANTS	REPRÉSENTATION SCIENTIFIQUE
<p>Les liquides sont compressibles, comme les gaz. La pression se bâtit progressivement, avec le temps, à mesure que le débit s'accumule et se comprime. Cette accumulation explique que, dans un conduit, le débit varie en fonction de la section. De même, le débit d'une pompe volumétrique varie de manière inversement proportionnelle à la pression. Il en découle qu'un vérin sans charge avancera plus rapidement qu'avec charge ; les pressions étant différentes, les débits le seront aussi.</p>	<p>Les liquides, contrairement aux gaz, sont pratiquement incompressibles. La pression est le résultat de l'application d'une force sur une surface ; elle se manifeste immédiatement. Par ailleurs, le débit d'une pompe volumétrique est constant, si on néglige les fuites. Il en découle que la vitesse d'un vérin sera indépendante de sa charge.</p>
<p>Le vide est impossible car les liquides ne sont ni compressibles ni expansibles. En fait, faire le vide consiste à décompresser, à étirer l'air qu'il y a, soit dans le récipient, soit dans le liquide, sous forme de particules. Ainsi, le vide est élastique ; c'est comme la compressibilité d'un gaz, mais à l'inverse ; plus on l'étire, plus il résiste. C'est une pression négative dont la valeur n'a pas de limite ni de lien avec la pression atmosphérique. Si rien ne rentre dans un vérin, rien ne sort, et le vérin ne bougera pas, pourvu que les parois résistent à l'implosion</p>	<p>Le vide, c'est l'absence de matière, donc absence d'air et de pression atmosphérique. Un vérin peut se déplacer, même sans aucun apport d'huile, si des forces menantes suffisent pour créer le vide, c'est-à-dire, pour créer une pression de -1 bar (environ), soit la valeur négative de la pression atmosphérique.</p>

Paradoxalement, le fondement de ces deux fausses représentations serait reliée essentiellement à une contradiction fondamentale présente dans l'esprit des étudiants, relativement au concept de compressibilité et d'incompressibilité. En effet, la première sous-tend

une compressibilité importante des liquides, ce qui permettrait une accumulation, tandis que la seconde s'appuie sur l'incompressibilité absolue des liquides : puisqu'un liquide n'est pas compressible, il n'est pas expansible ; il n'y a que les gaz qui le soient. Les étudiants conçoivent le vide non pas comme une absence d'air et de pression atmosphérique, mais, bien au contraire, comme la présence d'air soumis à une décompression. En fait, ils expliquent le phénomène à partir de la prémisse voulant que dans le vérin, ou dans l'huile, il y ait une certaine quantité d'air sur lequel s'effectue cette décompression qu'ils qualifient de vide. Cependant, pour eux, le vrai vide demeure impossible. D'ailleurs, en toute cohérence, ils n'établissent aucune relation entre le vide et la pression atmosphérique.

Nous pouvons percevoir l'importance centrale qui se dégage de ces fausses représentations des concepts de compressibilité et d'incompressibilité, particulièrement en raison de leur incidence sur d'autres concepts centraux de la discipline. En effet, il en découle directement une bonne appropriation des concepts de pression et de débit ainsi que la compréhension du rôle de la pompe volumétrique, en tant que source de débit constant, et de celui du régulateur de débit. On peut y voir aussi des répercussions sur le concept de la continuité du débit d'un liquide, évoqué précédemment (Blondin et al. 1992), et sur la manière dont celui-ci se distribue dans un circuit. Pour ce qui est du concept de vide, il intervient notamment dans le principe de fonctionnement de la pompe, du moteur et du vérin. Particulièrement pour ce qui est du vérin, on a souvent tendance à le négliger sous prétexte que la seule différence de 1 bar (la pression atmosphérique) n'est guère significative, nous en convenons, dans la balance des grandes pressions qui sont généralement en cause dans les systèmes hydrauliques. Or, la fausse représentation évoquée ici implique qu'aucune charge ne peut provoquer le vide dans un vérin. En d'autres mots, selon cette fausse représentation, il n'y aura pas de danger de chute incontrôlée d'une charge puisque le vide est tout

simplement impossible. Les étudiants doivent réaliser que le concept de vide est essentiel à une bonne appropriation des modèles explicatifs du fonctionnement de ces composants.

En conclusion, nous pouvons affirmer succinctement que, dans le domaine de l'énergie des fluides, les étudiants sont aux prises avec des difficultés conceptuelles majeures. Ils confondent des concepts centraux de la discipline tels force et pression, débit et vitesse d'écoulement, vitesse et puissance ; ils ont tendance à réifier des concepts tels la pression et la chaleur ; enfin, ils éprouvent des difficultés avec des principes fondamentaux tels la conservation de la matière, de l'énergie et du débit d'un liquide. Il ressort de nos travaux que, même à la fin de leur formation, les étudiants justifient tel ou tel phénomène par des théories naïves qui font appel à des représentations conceptuelles étrangères à celles de la science et de la technologie. Ces fausses représentations ont, selon nous, une incidence directe sur leur capacité de comprendre, d'anticiper et de diagnostiquer le comportement des systèmes. Nous pensons qu'un environnement d'apprentissage qui leur permettrait d'expérimenter et de vérifier leurs prédictions améliorerait cette situation.

CHAPITRE II

L'IDÉE DE DÉPART ET LES OBJECTIFS DE RECHERCHE

1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous abordons la question de l'idée de départ qui est à l'origine de cette recherche. Nous discuterons aussi, plus spécifiquement, des objectifs de recherche que nous poursuivons à l'égard de la problématique présentée au chapitre précédent.

2. L'IDÉE DE DÉVELOPPEMENT D'UN SYSTÈME D'APPRENTISSAGE

À partir de la problématique générale présentée au chapitre précédent, nous avons articulé une idée de développement d'un système d'apprentissage basé sur l'expérimentation assistée par ordinateur, avec lequel l'étudiant pourra construire et configurer des systèmes complets, les expérimenter, visualiser les phénomènes qui s'y produisent et observer les interactions entre les variables simultanément avec le comportement du système. Nous visons à rendre intelligibles ces phénomènes à l'aide de modèles explicatifs interactifs. Nous voulons mettre à la disposition de l'étudiant un véritable laboratoire virtuel d'expérimentation afin qu'il puisse créer des situations, modifier celles qui lui sont proposées, les mettre à l'essai et explorer toutes les hypothèses de fonctionnement voulues. Nous voulons aussi le placer dans une situation dynamique de résolution de problèmes qui l'incitera à utiliser ce laboratoire, à interagir avec les situations, à se poser des questions, à les expérimenter et à formuler des réponses ; nous pensons que cet environnement d'apprentissage favorisera la construction de ses connaissances et fera évoluer ses représentations conceptuelles.

3. LES OBJECTIFS DE RECHERCHE

Nos objectifs de recherche s'articulent autour des grandes orientations que nous venons d'exposer. Cependant, compte tenu de la méthodologie que nous avons utilisée (voir

chapitre III), les objectifs très généraux que nous visions au départ ont évolué de manière substantielle par rapport à ceux qui se sont concrétisés au fur et à mesure de la réalisation du prototype. Il y a, cependant, trois grands objectifs de recherche que nous avons poursuivis, de manière indéfectible, tout au long du processus du développement. Ils sont tous reliés au paradigme fondamental auquel nous adhérons, soit la conception constructiviste de l'apprentissage selon laquelle l'étudiant est l'auteur de ses propres apprentissages et que ceux-ci sont favorisés par la qualité des relations qu'il établit avec l'objet de connaissance. Les trois grands objectifs de recherche comportent des objectifs subordonnés :

1. L'environnement d'apprentissage doit prendre la forme d'un laboratoire virtuel d'expérimentation et doit susciter l'intérêt pour l'expérimentation. À cet égard, les objectifs poursuivis sont :
 - 1.1. Permettre la construction de situations qui placeront l'étudiant dans une situation dynamique de résolution de problèmes.
 - 1.2. Permettre la construction de situations qui faciliteront l'interaction de l'étudiant avec les systèmes.
 - 1.3. Permettre à l'étudiant d'élaborer, de configurer et de modifier rapidement des situations expérimentales.
 - 1.4. Procurer une rétroaction rapide, si possible en temps réel, des résultats de la simulation.

2. L'environnement d'apprentissage doit produire des simulations crédibles, c'est-à-dire le plus possible conformes à la réalité, tant du point de vue scientifique et technologique que de celui d'un observateur naïf. Toutefois, la complexité des situations réelles peut constituer un handicap, particulièrement au début des apprentissages ; c'est pourquoi il est important de pouvoir simplifier les situations à l'essentiel. À cet égard, les objectifs poursuivis sont :

2.1. Rendre compte, en termes qualitatifs observables et en termes quantitatifs, des phénomènes qui se produisent lors du fonctionnement des systèmes

2.2. Permettre la simulation de systèmes complets, c'est-à-dire en interaction avec des mécanismes usuels sur lesquels agissent divers types de forces et de charges.

2.3. Permettre l'expérimentation de systèmes sous des conditions « idéales » (théoriques) et sous des conditions « réelles » (proches du comportement réel).

3. L'environnement d'apprentissage doit supporter une approche de modélisation, c'est-à-dire conduire l'étudiant à découvrir, ou, à tout le moins, à constater les liens de cause à effet qui découlent de ses actions expérimentales. À cet égard, les objectifs poursuivis sont :

3.1. Permettre d'illustrer les modèles explicatifs et les interactions entre les variables.

- 3.2. Permettre la mise en oeuvre d'activités dirigées, sous forme notamment de leçons et d'une banque d'exercices, dans la but de favoriser les apprentissages autonomes.
- 3.3. Permettre l'élaboration de stratégies d'apprentissage basées sur le modèle du conflit conceptuel afin de favoriser le redressement des fausses représentations des étudiants.

Il est clair toutefois que le prototype de l'environnement d'apprentissage ne constitue pas un outil de modélisation en soi ; il s'agit plutôt d'un outil didactique qui permet aux enseignants qui le désirent de supporter la mise en œuvre d'une telle démarche d'apprentissage. Ainsi, la banque d'exercices expérimentaux et la description des phénomènes observables sont inclus. Par contre, les contenus des activités d'apprentissage sous forme de leçons ne sont pas incluses, mais les moyens pour les créer et les administrer le sont.

Afin de satisfaire les objectifs énoncés, nous avons élaboré les spécifications détaillées d'ordre didactique et technologique auxquelles devait satisfaire l'environnement d'apprentissage. Ces spécifications seront présentées, de manière succincte, au chapitre V, OPÉRATIONNALISATION DE L'IDÉE : ÉLABORATION D'UN MODÈLE D'ACTION PÉDAGOGIQUE.

CHAPITRE III

MÉTHODOLOGIE : LE MODÈLE DE RECHERCHE-DÉVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE

1. LA MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

Nous abordons ici la question de la méthodologie que nous avons utilisé pour opérationnaliser notre démarche de recherche. Celle-ci est basée sur le modèle de recherche-développement technologique de Nonnon (1987). Nous examinerons les fondements de ce modèle et discuterons des raisons qui nous ont conduit à l'adopter.

2. LE MODÈLE DE RECHERCHE-DÉVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE DE NONNON

Nonnon a mis au point un modèle de recherche-développement technologique en éducation selon lequel l'origine d'une telle recherche ne doit pas nécessairement découler, comme le voudrait le modèle traditionnel, de l'observation d'une situation problématique à laquelle on se propose d'apporter une solution en mettant à contribution les connaissances issues de la recherche appliquée, elles mêmes issues des fruits de la recherche expérimentale ; selon Nonnon, l'origine d'une telle recherche peut tout aussi bien découler d'une idée d'innovation. Dans ce cas, durant les premières phases de conception, la recherche reste libre de toute considération théorique et bénéficie pleinement de la créativité et de l'innovation du concepteur, comme c'est le cas dans la recherche industrielle. Pour les étapes ultérieures cependant, elle doit s'inscrire en harmonie avec les considérations théoriques, notamment en ce qui concerne le processus d'apprentissage. La figure 1 illustre les différentes étapes du modèle de Nonnon.

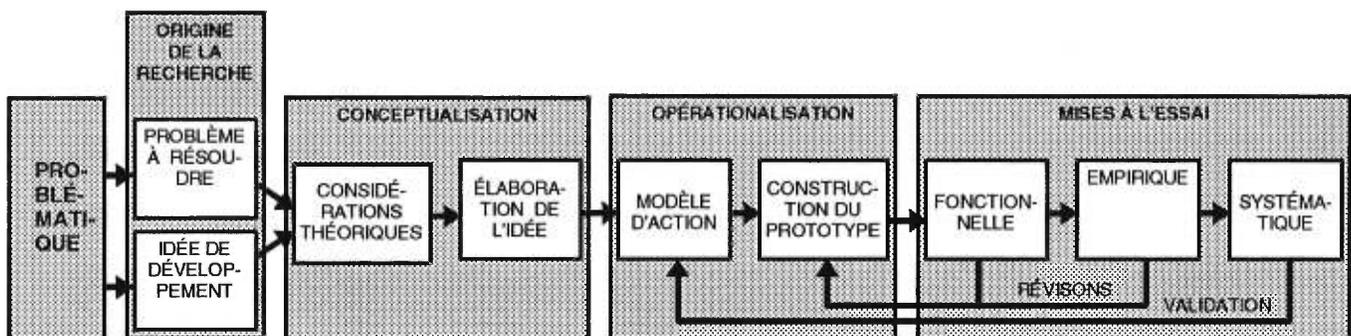


Figure 1 : Modèle de recherche-développement technologique en éducation de Nonnon

Selon l'auteur,

«Il faut imaginer des modèles de recherche-développement qui empruntent à l'approche expérimentale les fondements théoriques et les modalités de contrôle applicables à son objet, sans s'asservir pour autant au modèle expérimental et risquer ainsi de perdre la créativité et l'innovation qui lui sont propres.» (P.150).

3. LES FONDEMENTS DU MODÈLE DE NONNON

Nonnon explicite ainsi les fondements des différentes étapes de son modèle :

*«Dans une première approche, le **problème à résoudre** est déjà posé ; on procède alors à une **analyse** de type déductive de ce problème pour le mettre ensuite en rapport avec les connaissances et les faits établis par d'autres chercheurs en recherche expérimentale ou appliquée, et faire surgir ainsi une idée de solution. La deuxième approche débute avec une **idée** qui apparaît d'emblée intéressante à explorer ; cette idée est ensuite confrontée aux **théories** à travers des considérations susceptibles de l'appuyer, la rejeter, l'enrichir, cette étape permettant aussi de vérifier sa valeur d'originalité. Cette deuxième étape, prospective et théorique est très importante, elle doit être pour la recherche-développement ce qu'est le contexte théorique pour la recherche expérimentale, et c'est principalement par l'ampleur et la qualité de ces considérations et justifications théoriques qu'on va pouvoir distinguer une recherche-développement universitaire d'une recherche-développement industrielle. Vient ensuite, pour les deux approches, l'étape d'**élaboration** de l'idée, ses facettes et prolongements de toutes sortes. On procède à la conception d'un **modèle** d'action qui, à travers les choix techniques et décisions que doit prendre le chercheur, précise et opérationnalise l'idée ; puis on réalise un **prototype**, qui est la version concrète, voire matérielle du modèle. Le premier test du prototype est en fait la **mise à l'essai fonctionnelle**, faite en laboratoire et destinée à vérifier l'adéquation entre le modèle et le prototype en permettant de réviser ce dernier si besoin est. La **mise à l'essai empirique** s'apparente à la recherche action ; le chercheur n'impose pas d'emblée les objectifs ni les variables à considérer, les données réelles et leur modélisation devant apparaître au fur et à mesure de la mise à l'essai. Une étape finale, la **mise à l'essai systématique**, est requise si l'on envisage la production à grande échelle ou l'implantation du*

produit développé dans le milieu économique (ou éducationnel) : cette étape s'apparente cette fois à la recherche évaluative, voire à la recherche expérimentale, et elle peut donner lieu à l'invalidation du modèle lui-même. (pp. 151, 152)

4. JUSTIFICATION DE L'ADOPTION DU MODÈLE DE NONNON

En ce qui nous concerne, nous devons admettre qu'il est difficile d'établir, a posteriori, si l'idée de développement technologique découle d'avantage d'un problème que nous avons préalablement observé plus ou moins méthodiquement, ou inversement, si à mesure que l'idée germait, elle nous a permis d'entrevoir la possibilité d'un traitement plus satisfaisant des situations d'apprentissage qui nous semblaient inadéquates. En fait, en dernière analyse, les deux aspects nous paraissent indissociables. Ce qui est clair cependant c'est que nous n'avons pas décidé d'entreprendre cette recherche à partir de l'observation systématique et structurée d'une situation problématique ; au contraire, c'est à partir du moment où a pris forme l'idée de développer un laboratoire virtuel pour l'expérimentation de systèmes en simulation assistée par ordinateur, que nous avons commencé à structurer et à formaliser notre démarche. De ce point de vue, nous nous inscrivons donc résolument dans la deuxième approche du modèle de Nonnon.

Par ailleurs, si dès le début nous avons soumis notre idée de développement aux contraintes du processus traditionnel, si nous nous étions fixé, a priori, les objectifs et les variables de recherche sans permettre qu'elles apparaissent et se transforment au fur et à mesure du développement du prototype et de sa mise à l'essai, il est fort probable que sa forme finale aurait été moins novatrice. En effet, nous sommes d'avis que si nous avions assujéti notre démarche à des postulats théoriques préalables, le processus de création aurait pu être lourdement inhibé. Autrement dit, notre idée de départ s'est développée de manière spontanée, sans les contraintes formelles d'un «mandat» à respecter ou de «résultats» à atteindre. Dans le contexte où de telles contraintes existeraient, il aurait été

hasardeux d'envisager la mise en oeuvre de solutions technologiques de pointe dont l'issue serait fortement incertaine. Nous faisons référence ici, d'une part, au fait que l'environnement d'apprentissage qui a été développé fait appel à des aspects disciplinaires avancés et très peu répandus dans le domaine de l'enseignement pour ce qui est de la modélisation des systèmes et, d'autre part, au fait que cette modélisation ainsi que la manière dont le didacticiel doit en rendre compte (illustrations en temps réel, traitement des phénomènes en régime transitoire impliquant la dynamique des systèmes, prise en compte d'un très grand nombre de variables, multiplicité des morphologies des systèmes, etc.) font appel à une capacité de traitement informatique qui aurait été inaccessible, dans un contexte scolaire, deux ou trois ans auparavant. Somme toute, tout au long du développement du prototype nous avons eu à confronter nos intentions didactiques aux réalités de la faisabilité technologique, tout en traitant d'optimiser les situations lorsque des compromis se sont avérés incontournables. Le modèle de recherche-développement technologique de Nonnon intègre les processus nécessaires pour réaliser ce type d'ajustements.

Dans les chapitres qui suivent, nous présentons notre démarche de recherche pour chacune des étapes de ce modèle.

CHAPITRE IV

CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES

1. INTRODUCTION

Dans la problématique générale que nous avons exposée au chapitre I, nous faisons état du fait que les étudiants ne parviennent pas à expliquer ou à résoudre des problèmes et situations simples, qui n'exigent aucun calcul, mais plutôt une description qualitative des phénomènes, et du fait qu'ils sont aux prises avec des difficultés conceptuelles majeures, en ce sens qu'ils emploient des théories naïves qui font appel à des représentations conceptuelles étrangères à celles de la science et de la technologie. Nous verrons dans ce chapitre en quoi consistent les représentations conceptuelles et ses principales caractéristiques. Par ailleurs, nous disons aussi que, du point de vue épistémologique, l'approche d'enseignement traditionnel qui a cours en énergie des fluides est essentiellement basée sur l'étude du fonctionnement des composants, ce qui ne permet pas de rendre compte des interactions qui se produisent dans les systèmes. À ce sujet, nous aborderons aussi dans ce chapitre la question de l'approche systémique de modélisation et nous la relierons à la conception constructiviste et interactionniste de l'apprentissage. Dans ce contexte, nous discuterons de notre approche de modélisation en simulation assistée par ordinateur et verrons en quoi l'utilisation de l'ordinateur nous paraît pouvoir contribuer avantageusement à redresser les fausses représentations conceptuelles des étudiants.

2. LE PHÉNOMÈNE DES REPRÉSENTATIONS CONCEPTUELLES

2.1. INTRODUCTION

Dans cette section, nous nous intéressons au phénomène des fausses représentations conceptuelles des étudiants et aux problèmes d'apprentissage qu'elles posent. Dans un premier temps, nous explorerons le concept didactique de représentation, ce qu'il exprime et son cadre théorique. Nous étudierons les principales caractéristiques des fausses représentations conceptuelles ainsi que leur mécanisme d'élaboration. Nous exposerons

aussi les principaux éléments méthodologiques permettant de les identifier et explorerons les conditions didactiques à observer afin d'en tenir compte lors de l'élaboration des situations d'apprentissage. Finalement, nous tenterons de dégager les principales implications didactiques que soulève la problématique des fausses représentations.

2.2. LE CONCEPT DIDACTIQUE DE REPRÉSENTATION

Le concept de représentation est employé dans plusieurs champs disciplinaires tels la sociologie, la psychologie, l'histoire, la didactique, et l'épistémologie des sciences et des technologies. Étant donné la spécificité de chacune de ces disciplines, on comprendra l'absence d'une définition universellement reconnue. Nous présentons ci-après une étude succincte de ce concept afin de mieux le cerner.

Le concept de représentation a été évoqué depuis le XIX^e siècle par Durkheim, un des fondateurs de la sociologie en France. Cependant, ce n'est qu'en 1961 que Moscovici (1961) en a fait une étude exhaustive dans son traité *La psychanalyse, son image et son public*. Ce sociologue considère la représentation sociale comme une «*organisation psychologique, une modalité de connaissance particulière*» (p. 302). Peu après, dans Moscovici et al. (1962) les auteurs précisent davantage le concept : contrairement à la théorie, laquelle définit l'ensemble des concepts correspondant au savoir collectif à une époque donnée, une représentation est une organisation particulière de ce savoir collectif chez une personne isolée. Il s'agit de l'explication personnelle que ce sujet donne aux phénomènes qu'il perçoit.

Par la suite, d'autres auteurs ont contribué à expliciter plus loin ce concept de représentation. Voici quelques définitions :

«Unité d'images, d'opinions, de croyances et d'attitudes, la représentation est la fabrication d'un système d'orientation cognitive et affective dans l'environnement ma-

tériel et social. La représentation est une expression d'un sujet fabricant de significations» (Kaes, 1968, p. 59).

«La représentation est constituée par l'ensemble des propriétés de l'environnement construites et organisées par le sujet à un moment donné. Cette représentation qui résulte des actions du sujet est donc étroitement liée aux tâches de celui-ci, ce qu'on exprime souvent en disant qu'elle est opératoire» (Leplat, 1976, p. 8).

«Une représentation correspond à une structure sous-jacente, à un modèle explicatif organisé, le plus souvent simple et logique, personnel ou d'origine sociale, qui est en rapport avec une structure de pensée et un niveau d'évolution. Ce modèle se trouve actualisé par une activité ou une famille de questions et peut évoluer au fur et à mesure que se construisent les concepts» (De Vecchi, 1987, p. 223).

À partir de ces définitions, on peut dégager, d'une part, que les représentations sont composées d'un ensemble d'images, d'analogies et de modèles qui constituent des mécanismes complexes servant à former une structure cognitive cohérente et particulière à chaque individu et, d'autre part, que ces représentations semblent résulter d'une interaction entre la personne et son environnement, d'où leur caractère distinct et diversifié d'un individu à un autre.

2.3. LES DIVERS TYPES DE REPRÉSENTATION

Dans le prolongement des travaux de Moscovici, Ackermann et Rialan (1963) ont proposé une classification de la représentation sociale. Ils distinguent trois catégories : les représentations *descriptives*, les représentations *opératoires* ou instrumentales et les représentations *conceptuelles*. Dans un article synthèse, Migne (1976) illustre ainsi chacune d'elles :

- 1° *« Les représentations descriptives : le sujet sélectionne quelques éléments de son expérience quotidienne et professionnelle, plus ou moins disparates, et les décrit sommairement. Il met l'accent sur les états plus que sur les processus et la représentation est une image passive, une constatation de faits.*

- 2° *Les représentations opératoires ou instrumentales : le sujet met en relation les éléments de connaissances ou d'expérience avec sa propre action en vue de la réalisation d'un but pratique. Elles ne se réduisent plus aux états mais portent sur les opérations.*
- 3° *Les représentations conceptuelles : il y a une véritable analyse notionnelle des processus, une représentation de la dynamique interne des phénomènes et non seulement des conditions visibles de l'action technique. Le sujet essaie de fonder sur des lois de la nature les catégories et fonctions qu'il utilise dans la pratique en s'aidant des connaissances acquises à l'école auxquelles il intègre des éléments d'expérience personnelle » (p. 25-26).*

Nous retiendrons particulièrement cette dernière catégorie puisqu'elle se rapproche davantage des questions qui intéressent l'épistémologie et la didactique des sciences et des technologies, en ce sens qu'elle « *porte sur les règles appuyées sur des lois scientifiques et le sujet cherche à rendre compte des événements par la combinaison d'un nombre limité de variables ou facteurs déterminants* » (p. 26).

Ainsi, les représentations conceptuelles découlent d'un long processus de reconstruction de l'objet de connaissance et, par conséquent, ne résultent pas de simples formulations ou d'observations passives. Elles se construisent progressivement, par vagues successives et des raffinements multiples qui interviennent à mesure que des liens se créent entre divers concepts connexes, liens qui se renforcent avec des expérimentations diversifiées, étalées dans le temps. Lorsque ces représentations ne sont pas conformes à celles scientifiquement admises, Piaget les qualifie de représentations spontanées. Selon lui,

« Elles sont le fruit d'un très long travail de structuration et de maturation réalisé par le sujet. Elles résultent d'une assimilation déformante effectuée depuis longtemps à partir d'apports aux origines les plus variées (milieu familial, socio-culturel, scolaire, expérience, vécu, média...). Elles résistent tant à l'apprentissage qu'à la contre-suggestion dans les entretiens cliniques » (Piaget, 1947, p. 5-30, cité par Jonnaert, 1988, p. 57).

Selon cette perspective, il serait aléatoire, voire hasardeux, d'espérer l'abandon complet d'une représentation naïve au profit de la représentation scientifique, à la suite d'une démarche d'apprentissage planifiée dont la durée serait nécessairement restreinte, telle qu'on pourrait la pratiquer dans un contexte scolaire. Mais alors, comment peut-on expliquer ce phénomène de persistance évoqué par Piaget ? Quelles sont les caractéristiques des représentations ? Comment peut-on les mettre en lumière ? Les sections suivantes explorent ces aspects.

2.4. CARACTÉRISTIQUES DES REPRÉSENTATIONS CONCEPTUELLES

Dans un ouvrage consacré à la didactique de la physique, Lemeignan et Weil-Barais (1993) présentent une synthèse de la problématique des représentations des étudiants et de leur incidence sur la manière dont se construisent les concepts scientifiques, notamment à travers d'activités expérimentales de modélisation. Ces auteurs constatent que, « *en regard des caractéristiques des représentations du sens commun, les représentations construites par les scientifiques apparaissent comme fondamentalement différentes* » (p. 9).

Le tableau suivant, tiré de ce même ouvrage, résume ces caractéristiques.

LES REPRÉSENTATIONS PERSONNELLES	LES REPRÉSENTATIONS SCIENTIFIQUES
Non conscientes	Conscientes
Implicites	Explicites
Individuelles	Partagées par une communauté
Locales (domaine de validité restreint et non explicité)	Générales (domaine de validité spécifié)
Non flexibles	Flexibles
Centrées sur les objets, leurs propriétés et leurs fonctions	Centrées sur les systèmes et leurs descripteurs

TABLEAU II Caractéristiques des représentations personnelles et des représentations scientifiques.

Concernant la manière dont les représentations sont élaborées, Giordan et De Vecchi (1987) estiment qu'elles sont construites par l'interaction des composantes fondamentales du modèle suivant (p. 87) :

CONCEPTION = F (P.C.O.R.S.) (NOTE : les auteurs utilisent le terme «conception»)

P = Problème : Ensemble des questions plus ou moins explicites qui induisent ou provoquent la mise en oeuvre de la conception. (C'est en quelque sorte le moteur de l'activité intellectuelle).

C = Cadre de référence : Ensemble des connaissances périphériques activées par le sujet pour formuler sa conception (ce sont les autres représentations sur lesquelles l'apprenant s'appuie pour produire ses conceptions).

O = Opérations mentales : Ensemble d'opérations intellectuelles ou transformations que l'apprenant maîtrise et qui lui permettent de mettre en relation les éléments du cadre de référence et ainsi de produire et d'utiliser la conception (les invariants opératoires).

R = Réseau sémantique : Organisation mise en place à partir du cadre de référence et des opérations mentales. Elle permet de donner une cohérence sémantique à l'ensemble et par là produit le sens de la conception (le sens du construct apparaît à partir des liens «logiques» établis entre les différentes conceptions principales et périphériques).

S = Signifiants : Ensemble de signes, traces et symboles nécessaires à la production et à l'explication de la conception.

Il se dégage de ce modèle que toute construction d'une représentation serait sous-jacente à un problème, qu'il soit explicite ou implicite. La représentation constitue alors le résultat d'un effort d'explication du problème. Cette explication s'élabore par l'interaction des quatre autres paramètres du modèle : 1) le *cadre de référence*, ou ensemble de connaissances antérieures, qui donnent un cadre à la nouvelle conception et qui amènent le sujet à se poser des questions ; 2) les *opérations mentales* qui permettent de mettre en relation les éléments du cadre de référence et de faire évoluer la conception préexistante à partir des informations reçues pendant le processus d'élaboration ; 3) le *réseau sémantique* qui transcende les deux premiers et qui constitue un réseau de signification et où, pour ainsi dire, les noeuds délimitent le cadre de référence, tandis que les liaisons seraient les opérations mentales et, finalement, 4) les *signifiants* qui constituent les diverses formes du langage (naturel, mathématique, schématique, etc.) mises à contribution pour produire et expliciter la conception. Bien entendu, ces divers éléments fonctionnent de manière dynamique et interdépendante.

2.4.1. CARACTÈRE CORIACE DES REPRÉSENTATIONS SPONTANÉES

De nombreuses recherches (Delacote et al., 1983 ; Novak, 1987 ; Astolfi et Develay, 1989), montrent le caractère coriace des représentations spontanées. En fait, bon nombre de celles-ci persistent encore chez les étudiants universitaires. C'est que ces représentations existent, la plupart du temps, depuis l'enfance, même avant l'âge scolaire. Elles ont été forgées au gré des diverses situations vécues ; graduellement, elles ont servi d'appui à la construction de nouvelles conceptions plus complexes. La trame conceptuelle ainsi produite, quoiqu'inexacte du point de vue scientifique, n'en demeure pas moins cohérente et fonctionnelle, dans son ensemble, aux yeux de la personne qui l'a développée. Cela ne

signifie aucunement que cette structure lui permette d'expliquer toutes les situations observées. En effet, elle peut subsister malgré certaines contradictions si celles-ci ne sont pas de nature à gêner le fonctionnement habituel de la personne. En d'autres mots, une structure conceptuelle peut s'accommoder d'incohérences pour autant que celles-ci soient facilement contournables, soit en évitant d'avoir à les tirer au clair (solution de facilité), soit en adoptant, de manière circonstancielle, une règle particulière adaptée à la situation (solution par la règle d'exception), ou encore, tout simplement en l'attribuant à un autre concept qui n'est pas encore maîtrisé (solution par l'aveu d'incapacité). C'est que, comme le constatait déjà Bachelard en 1938, *«il vient un temps où l'esprit aime mieux ce qui confirme son savoir que ce qui le contredit, ou on aime mieux les réponses que les questions. Alors l'instinct conservatif domine»*. (Cité dans Giordan et De Vecchi, 1987, p.46).

2.4.2. COEXISTENCE DE NIVEAUX MULTIPLES : PHÉNOMÈNE DE «PLACAGE»

Une structure conceptuelle peut cohabiter avec d'autres structures parallèles, plus ou moins complètes, chacune d'elles pouvant être utilisée dans un contexte explicatif distinct. Il s'agit d'une extension de la règle d'exception évoquée précédemment. L'élève utilise alors, selon le contexte et les circonstances, telle ou telle explication pour satisfaire les attentes ou, tout simplement, pour se tirer d'affaires. Ainsi, en ce qui concerne les enseignements dispensés à l'école, tout se passe comme si l'apprenant utilisait un cadre explicatif théorique (celui exigé dans le contexte formel scolaire) qui serait distinct de celui applicable dans la réalité de la vie courante. C'est le phénomène de «placage» illustrant le fait que l'apprenant n'intègre pas les nouvelles connaissances de manière harmonieuse dans sa structure conceptuelle préexistante, mais plutôt qu'elles s'implantent, pour ainsi dire, sur une nouvelle couche indépendante de l'autre. Cette structure alternative sera mise à contribution seulement dans les contextes semblables à celui dans lequel elle a été élaborée. Cependant, si la situation est différente, la structure originale sera privilégiée. Qui plus est, seule la struc-

ture originelle est prégnante : « *On remarque chez les étudiants la tendance à faire coexister les deux conceptions, l'une (la leur) utile dans le quotidien et l'«autre» pour les examens scolaires !* » (Larochelle et Désautels, 1992). Cette coexistence de plus d'une structure conceptuelle est particulièrement mise en relief par la croyance fort répandue selon laquelle la théorie est une chose et la pratique, une autre. Cette vision des choses soulève toute la question de la pertinence et de la crédibilité des enseignements académiques, tout au moins aux yeux des apprenants.

Giordan et al. (1987) interprètent ainsi ce phénomène complexe de «placage» des connaissances:

« Le savoir ne remplit pas un vide mais se substitue peu à peu à des représentations «spontanées» qui expriment la vision que les enfants ont du monde. Ces représentations sont des traductions du réel qui ne résultent pas d'une analyse rigoureuse. Ce sont des images non épurées, qui s'appuient sur des analogies superficielles, dont les termes ne sont pas définis de façon univoque et qui sont donc difficilement communicables. Elles ne sont nullement mises en question, aux yeux des enfants, par des contradictions internes qui apparaissent lorsqu'on les analyse avec notre regard d'adulte spécialiste, et ne peuvent être brisées par l'application externe de notre logique. Malgré tous ces caractères, les représentations ne sont pas un jeu gratuit pour les enfants. Elles sont cohérentes pour eux et ont une valeur explicative en fonction de leurs modes de pensée spécifiques » (p. 34).

2.4.3. FONDEMENT SENSORIEL DES REPRÉSENTATIONS SPONTANÉES

Les représentations spontanées de notions scientifiques ont souvent un fondement essentiellement sensoriel, tandis que les conceptions scientifiques sont éminemment construites. Ainsi, les concepts relativement accessibles tels le poids, la température ou la vitesse sont, pour le moins en première approche, intuitifs, portés par l'évidence et perceptibles par les sens. Par contre, des concepts tels la pression, le courant, l'accélération,

l'énergie ou la puissance sont des constructions de l'esprit scientifique, difficiles sinon impossibles à observer directement. De plus, certains concepts sont expliqués dans un contexte idéalisé, loin de la réalité quotidienne. Pensons à la plume qui, dans le vide, tombe à la même vitesse qu'une bille d'acier, ou encore au fait qu'en l'absence de frottement un corps en mouvement conserve une vitesse constante, alors que dans la vie courante il faut lui appliquer une force pour maintenir ce mouvement.

Ainsi, les concepts scientifiques constituent des abstractions dont l'objet premier est relié au besoin d'expliquer les phénomènes complexes. Ils sont « *le fruit d'un processus d'abstraction et de formalisation, qui s'établit le plus souvent en rupture par rapport à l'évidence* » (Giordan et De Vecchi, 1987). Pas étonnant alors que ces constructions soient souvent perçues comme n'étant aucunement explicatives de l'évidence perceptible et, de ce fait, en rupture avec la réalité. Après tout, comme le disait Locke en 1690 dans *son Essai sur l'entendement humain*, « *Plus d'idées innées, plus de principes à priori ; il n'y a dans l'entendement d'autres éléments que ceux qu'apporte la sensation* ». Abondant dans le même sens, Condillac en 1754 dans son *Traité des sensations*, écrit : « *Nihil est in intellectu quod non fuerit in sensu* » ou *rien n'est intelligible qu'à travers les sens*. Cette perception de la science était fortement répandue et a prévalu jusqu'à la fin du siècle dernier, même parmi les hauts responsables de l'enseignement. Elle illustre la difficulté que pose le passage des conceptions qui sont portées par le «sens commun» et par «l'évidence» vers les conceptions plus abstraites, construites en marge des perceptions sensorielles.

2.5. AMPLEUR DU PHÉNOMÈNE

Le savoir scientifique est une construction de l'esprit. La plupart du temps, il est en rupture épistémologique avec les évidences antérieures. De plus, il se présente en confrontation avec la réalité observable et à l'encontre du « bon sens ». Comme le disait Bachelard (1975), « *L'esprit scientifique ne peut se constituer qu'en détruisant l'esprit non scientifique [...] il ne s'agit pas d'acquérir une culture expérimentale, mais bien de changer de culture, de renverser les obstacles amoncelés par la vie quotidienne* ».

Cependant, Giordan et De Vecchi (1987) estiment que cette affirmation est trop forte. Ils émettent l'hypothèse selon laquelle « *les représentations «évoluent» ou se «modifient» : ainsi, un savoir neuf ne détruit pas le modèle préexistant mais, le plus souvent, l'oblige à s'adapter, afin que cette nouvelle structure puisse intégrer la connaissance supplémentaire* » (p 169).

Ainsi, le phénomène des représentations est éminemment complexe et il appert, à la lecture de résultats des recherches, que toute entreprise visant à en caractériser la genèse soit vouée à un constat de généralités peu descriptif des cas individuels. Autrement dit, il existerait, probablement pour chaque individu, un contexte de construction distinct, basé sur des circonstances particulières, pouvant expliquer l'origine et la prégnance d'une représentation.

Ces considérations amènent plusieurs auteurs et chercheurs à s'interroger quant à la portée possible de toute stratégie de redressement des fausses représentations conceptuelles. On évoque aussi, dans une perspective historique, l'aspect somme toute éphémère de la représentation d'un concept scientifique ; après tout, les représentations acceptées aujourd'hui ont supplanté celles d'hier et elles seront, tôt ou tard, supplantées à leur tour. De

plus, ce sont les représentations antérieures qui ont permis d'accéder aux actuelles. Somme toute, il vaudrait mieux essayer de composer avec la réalité.

Cette perspective, que l'on pourrait qualifier de pragmatique, n'est guère utile face aux exigences du contexte d'enseignement scientifique et technologique moderne. En effet, de multiples travaux mettent en évidence l'incapacité des étudiants à expliquer et à anticiper le comportement de situations expérimentales simples, et ce, pour des raisons reliées directement aux représentations qu'ils mettent à contribution. Particulièrement en enseignement technologique, les étudiants sont confrontés à des situations expérimentales concrètes et, lorsque les représentations conceptuelles qu'ils mettent en oeuvre sont inopérantes, les conséquences sont observables.

Ce qui fait qu'une représentation correspond à une connaissance c'est qu'elle est utilisable, c'est-à-dire qu'elle débouche sur l'action. En ce sens, apprendre c'est passer d'une représentation fautive à une représentation plus juste, c'est-à-dire avec élargissement de son champ de validité.

Dès lors, la question centrale est de savoir quelle serait la meilleure façon de rendre les étudiants conscients du fait que leurs fausses représentations sont inopérantes, comment rendre ces faits observables avec un maximum d'économie de temps et de moyens et comment, à travers ces observations, peut-on optimiser les conditions d'apprentissage afin qu'ils puissent se rendre compte de la nécessité de faire évoluer leurs conceptions.

2.6. MOYENS ET MÉTHODES POUR IDENTIFIER LES FAUSSES REPRÉSENTATIONS.

Les fausses représentations ne sont que très rarement évidentes ou transparentes. Leur mise à jour implique une démarche à la fois complexe et subtile. La plupart du temps, il faut les inférer à partir d'indices parcellaires, parfois contradictoires, car les représentations sont des modèles sous-jacents à un système explicatif plus général. C'est pourquoi,

leur identification fait appel à la contribution de plusieurs outils et stratégies didactiques complémentaires.

Quoiqu'il n'existe pas une méthodologie largement reconnue, la plupart des chercheurs font appel à l'une ou l'autre des approches suivantes :

Une pratique simple et accessible consiste à faire un suivi des situations d'apprentissage, avec des observations en classe et une analyse des propos des apprenants. Ceci permet souvent d'identifier les représentations dominantes dans un groupe et les principales difficultés d'apprentissage qu'elles occasionnent. Cependant, cette pratique ne permet pas de dépasser un premier niveau d'analyse des représentations exprimées, et encore moins de faire émerger les conceptions sous-jacentes aux propos formulés. En d'autres mots, il s'agit d'une approche facilement praticable en groupe, permettant de faire ressortir les aspects les plus accessibles des représentations. Il peut s'agir aussi d'un outil privilégié pour un enseignant qui désire faire prendre conscience à ses étudiants que tous n'ont pas la même conception des choses et qu'il conviendrait de discuter du problème. On peut ainsi contribuer à lancer une réflexion de groupe propice à la construction de nouveaux concepts.

Cependant, lorsqu'on se propose d'analyser plus en profondeur les fausses représentations, l'approche couramment utilisée s'apparente à la méthodologie de recherche qualitative. Elle consiste à faire un premier dépistage, généralement à l'aide d'un questionnaire écrit, auprès d'un assez grand nombre d'étudiants. L'analyse des résultats de ce questionnaire permet de formuler une série d'hypothèses de fausses représentations. Ces hypothèses servent de base à l'élaboration de nouvelles situations plus spécifiques, lesquelles sont ensuite administrées à un nombre plus restreint d'étudiants dans le cadre d'entrevues cliniques individuelles. Au cours de ces entrevues, les apprenants sont amenés à expliciter leur

compréhension des situations, tandis que l'enseignant pratique un questionnement épistémologique de type piagetien consistant à leur faire verbaliser, à les inciter à préciser le pourquoi de telle ou telle affirmation ; qu'est-ce qu'ils entendent par...? À quoi font-ils référence ? Comment expliquer ce qu'ils observent ? Pourquoi telle différence ou telle ressemblance ? Contrairement, il faut éviter des questions fermées du type : pourquoi ? Comment on définit... ? Quelle est la formule... ?, car elles conduisent souvent à des impasses.

Laroche (1970) explique ainsi la démarche utilisée par Migne (1967) dans ses travaux :

«La méthode consiste à s'entretenir avec le sujet sur des questions de ce genre :

- *Vous avez un objet dans la main (briquet, crayon...). Vous la lâchez. Que se passe-t-il ? Expliquez pourquoi.*
- *Supposez que vous fassiez la même chose en vous trouvant sur la lune. Que se passerait-il ? Expliquez pourquoi.*
- *Supposez que vous fassiez la même chose en étant dans le vide. Que se passerait-il ? Expliquez pourquoi.*

Les entretiens peuvent comporter : a) l'emploi du dessin ; b) l'emploi de dispositifs très simples qui permettent au sujet de constater certains effets, après qu'on lui ait demandé de prévoir ce qui va se passer» (p. 28).

De leur côté, Giordan et De Vecchi (1987) élaborent ainsi leur méthodologie (p. 96) :

- *« Pré-test : questionnaire écrit, suivi d'un court entretien avec certains enfants pour leur faire expliciter leurs textes ou leurs dessins, et discussion avec le groupe classe, celle-ci étant enregistrée au magnétophone ou au magnétoscope, ce qui amène à mieux cerner les conceptions qui émergent.*
- *Suivi du déroulement de l'action pédagogique.*
- *Post-test reprenant les préoccupations soulevées dans le pré-test.*

- *Comparaison des deux tests et entretiens avec quelques élèves, pris isolément, permettant d'affiner les réponses au post-test, quand celles-ci paraissent ambiguës ou particulièrement intéressantes ».*

Au cours des entrevues, une attention particulière doit être portée au fait qu'une formulation correcte d'un phénomène ou d'une explication ne présume en rien de sa véritable compréhension par l'apprenant. Il s'agit de cerner le mieux possible le sens qu'il donne à ses mots et de centrer son discours autour de la compréhension et l'intelligibilité de la situation qui lui est proposée. Cette technique de questionnement constitue l'outil par excellence permettant de faire émerger les représentations.

Pour ce qui est de la construction des situations, autant pour le questionnaire écrit que pour les entrevues, il faut qu'elles demeurent simples, c'est-à-dire qu'elles comprennent très peu d'éléments, qu'elles soient familières, qu'elles fassent appel aux concepts de base et qu'elles soient bien élaguées de distracteurs. De plus, il est essentiel que les situations soient le plus possible dépourvues de formalismes théoriques ou mathématiques. En d'autres mots, elles doivent surtout faire appel à une compréhension essentiellement qualitative des phénomènes mis à contribution.

Par ailleurs, il faut considérer que les situations proposées ne constitueront, somme toute, que le point de départ du questionnement. Au fur et à mesure des propos de l'apprenant, le questionnement évoluera vers des sentiers tout à fait imprévisibles... et pourtant pertinents car, souvent, les fausses représentations émergent à partir de situations qu'on ne pouvait pas soupçonner à priori. En effet, il arrive fréquemment qu'une fausse représentation s'exprime en réaction avec un autre sujet que celui présenté au départ. C'est pourquoi il est important, au cours des entrevues, de relancer le questionnement à partir des propos de l'étudiant afin de lui faire préciser sa pensée.

2.7. EXEMPLES DE FAUSSES REPRÉSENTATIONS CONCEPTUELLES ET DE LEURS IMPLICATIONS DIDACTIQUES.

De nombreuses recherches en didactique des sciences ont exploré la question des représentations, notamment sur des concepts de physique, électricité, biologie, etc. ainsi que sur des principes fondamentaux tels la conservation de la matière et de l'énergie, et la continuité du débit et du courant dans les conduits. Dans les pages qui suivent, nous présentons un aperçu de quelques uns de ces travaux.

2.7.1. QUELQUES REPRÉSENTATIONS CONCEPTUELLES EN DYNAMIQUE

Le champ de la mécanique newtonienne a fait l'objet de plusieurs travaux bien documentés en ce qui concerne la compréhension des représentations conceptuelles des apprenants (du primaire à l'université) par rapport aux concepts qui constituent le fondement de l'édifice théorique de cette discipline. Ces recherches ont porté essentiellement sur les représentations des étudiants relativement aux concepts tels le mouvement, la force, le poids et la masse. Elles illustrent que la majorité des représentations sont erronées par rapport à la norme scientifiquement admise. Ainsi, ces représentations sont bien ancrées dans la structure conceptuelle des apprenants et constituent des obstacles à l'apprentissage ; elles persistent même après un enseignement scientifique.

REPRÉSENTATION ANIMISTE DU CONCEPT DE FORCE

Il s'agit d'une représentation mise en évidence par Osborne (1980) et Watts (1983), consistant à attribuer au concept de force des propriétés analogues à celles du domaine du vivant. Ainsi, la force représente une entité vivante capable, par exemple, de battre la force de gravité. Cette représentation est en rupture par rapport à la représentation scientifique voulant que la force soit le produit de la masse par l'accélération d'un objet.

REPRÉSENTATION ARISTOTÉLICHIENNE DU MOUVEMENT

Les recherches portant sur la compréhension du concept de mouvement par les étudiants de différents pays démontrent qu'ils font référence à des modèles explicatifs qui ont prévalu bien avant les travaux de Newton au XVII^e siècle. Par exemple, Viennot (1978) a démontré que les étudiants de première année universitaire ont une représentation aristotélicienne du concept de mouvement, voulant que si l'on applique une force constante à une masse, celle-ci se déplacera à une vitesse constante. Autrement dit, il s'agit d'une représentation erronée selon laquelle tout objet en mouvement doit nécessairement avoir des forces agissant sur lui dans la direction du mouvement. Viennot synthétise ainsi ce résultat :

« [...] la dynamique newtonienne établit une relation linéaire : $F = m \cdot \gamma$ entre le vecteur force exercé sur une masse ponctuelle, et une caractéristique du mouvement, le vecteur accélération, qui est un taux horaire de variation du vecteur vitesse [...] Ce modèle formel ne coïncide que très partiellement avec l'approche intuitive généralement répandue selon laquelle un mouvement suppose une force agissant dans le même sens, et l'immobilité, même passagère, suppose l'absence de force. C'est entre force et vitesse, plutôt qu'entre force et accélération que, spontanément, on établirait une relation linéaire [...] Ce type de tendance spontanée survit à l'enseignement» (p. 16).

Par ailleurs, Mullet (1990) a démontré, à l'aide d'expériences simples, que, des étudiants fréquentant des établissements secondaires (2^e cycle en France), confondent les concepts de poids (poids = masse x accélération due à la gravité) et celui de masse (masse = volume x densité). L'auteur résume ainsi ses observations :

« [...] when subjects are asked to judge the weight or the mass of a variety of objects, fifth-grade students tend to take the same pieces of information - volume, density and gravitation - into account. Thus, over all, there seems to be some justification for saying that the two concepts are not clearly differentiated, as formulated by the equation :

Weight = Volume + Density + Gravitation = Mass» (p. 223)

The findings clearly indicate that when subjects are asked to express judgements on a quantity of matter scale rather than a mass scale, only two pieces of information affect their judgements : volume and density. The gravitation effect vanishes entirely. This set of results can be defined by the equation :

Quantity of Matter = Volume + Density = Mass

The integration patterns for the mass and the quantity of matter conditions differ » (p.224).

2.7.2. QUELQUES REPRÉSENTATIONS DES ÉLÈVES SUR L'ÉNERGIE, LA CHALEUR ET LA TEMPÉRATURE

Dans ce domaine de la physique, plusieurs représentations des étudiants ont été caractérisées dans le cadre de travaux menés par des chercheurs de l'INRP (Institut National de Recherche Pédagogique, Paris). Les résultats de plusieurs de ces travaux ont été publiés dans le numéro 2 de la revue ASTER « *Éclairages sur l'énergie* ». Les extraits suivants (Tableau III) sont tirés et adaptés de Agabra (1986) signataire du chapitre « *Échanges thermiques* » (p. 32).

TABLEAU III REPRÉSENTATIONS DES ÉLÈVES SUR L'ÉNERGIE, LA CHALEUR ET LA TEMPÉRATURE

Indifférenciation chaleur- température-substance	Croyance en l'existence de corps chauds et froids par nature. Confusion isolants-sources de chaleur.
Indifférenciation chaleur- température	Croyance que la température est le seul paramètre opérant dans les échanges thermiques. (sans considérer masse, substance...). Impossibilité de construire la notion quantitative de quantité de chaleur.
Substantialisation de la chaleur	Impossibilité de construire correctement l'équivalence chaleur-travail. La chaleur apparaît comme un simple agent causal du mouvement.
Non conservation de la chaleur	Impossibilité de construire la notion de quantité de chaleur.
Confusion énergie- transfert d'énergie	Impossibilité de construire (ou de comprendre) le principe d'équivalence. Croyance que la forme de transfert d'énergie détermine certains effets spécifiques, c'est-à-dire détermine la forme d'énergie stockée dans un système.

2.7.3. QUELQUES REPRÉSENTATIONS DES ÉLÈVES EN GÉNÉTIQUE, EN IMMUNOLOGIE ET EN PHYSIOLOGIE

Le domaine de la biologie et des sciences naturelles a fait aussi l'objet de nombreux travaux, notamment de la part des chercheurs de l'INRP.

Astolfi (1992) réfère en ces termes aux travaux de Rumelhard (1986) :

« Il a bien expliqué comment domine une origine sociale pour les représentations de la génétique ou de l'immunologie. [...] Il montre l'importance des métaphores guerrières dans la compréhension des phénomènes immunitaires et le poids du vocabulaire qui en découle : l'invasion microbienne, les défenses de l'organisme, la lutte contre les microbes, les anticorps, etc. Tout cela témoigne d'une représentation sociale qui tend, sur la base de la biologie instaurée par Pasteur, à penser la maladie comme fondamentalement exogène, comme extérieure à un individu fondamentale-

ment sain, comme procédant des menaces d'un environnement toujours prompt à altérer notre intégrité» (P. 88).

En ce qui concerne le thème de la digestion, Giordan et De Vecchi (1987) remarquent :

«En fait, il n'y a pas grande différence entre les conceptions d'enfants n'ayant jamais abordé l'appareil digestif et celles des sujets plus âgés l'ayant traité une, deux, trois et même quatre fois, dans le cadre de l'enseignement qu'ils ont reçu. Seul «l'emballage», la présentation changent ; à part quelques exceptions, les idées de base restent les mêmes. (p19) [...] Mais le plus significatif c'est sans doute cette impression de savoir que possède l'étudiant et qui est créée par le fait qu'il utilise une terminologie portant en elle une image de sérieux. De plus, il peut relier ces mots à d'autres mots. D'où le désintérêt qu'il éprouve à essayer d'en savoir plus, du moins tant qu'il ne se trouve pas confronté à des problèmes qui impliquent, dans leur résolution, la maîtrise de telles connaissances. Nos nous trouvons donc en face d'un « pseudo savoir» qui ne peut, en aucune manière, être utilisable» (p. 24).

2.7.4. QUELQUES REPRÉSENTATIONS DES ÉTUDIANTS EN ÉLECTRICITÉ

L'électricité constitue, avec la physique élémentaire, un des domaines qui a été le plus abondamment exploré. Nous faisons référence ici, seulement à quelques travaux parmi les plus significatifs portant sur des circuits simples tels le branchement d'une ampoule à une source d'énergie (une batterie) avec des fils conducteurs.

LE MODÈLE DES COURANTS ANTAGONISTES

Les travaux de Thibergien et Delacote (1976) ont illustré que les enfants ont tendance à brancher un seul conducteur entre la pile et l'ampoule. Constatant que ça ne marche pas, ils expliquent que, lorsqu'un deuxième fil est branché à l'autre pôle, il laisse passer aussi un courant vers l'ampoule. Les deux courants antagonistes sont alors consommés dans l'ampoule produisant ainsi la lumière. Par la suite, les travaux de Joshua et Dupin (1989)

ont montré que « *pour certains élèves, les deux fils transportent le même type de courant. Il faut deux fils pour amener plus de courant. Pour d'autres, il y a bien deux courants différents qui sortent de la pile pour aller « faire des étincelles ».*

LE MODÈLE DU COURANT QUI «S'ÉPUISE»

Johsua et Dupin (1989) ont caractérisé aussi le modèle selon lequel le courant «s'use» lors du passage dans un appareil. Plus les appareils sont nombreux, plus le courant en sort «épuisé». Les auteurs constatent que ce modèle n'est pas présent de manière spontanée chez les enfants qui découvrent les phénomènes électriques. Il apparaît à la suite d'un enseignement qui utilise l'analogie des liquides pour expliquer le comportement de l'électricité. Cette manière de concevoir perdure jusqu'au niveau universitaire

2.8. IMPORTANCE D'EN TENIR COMPTE DANS LES ACTIVITÉS D'APPRENTISSAGE.

Ainsi, nous entendons par représentations l'ensemble d'images, d'analogies et de modèles qui constituent des mécanismes complexes qui servent à former une structure conceptuelle cohérente et particulière à chaque individu. Cette structure détermine le fondement épistémologique, le cadre de référence, auquel doit se conformer tout nouvel apprentissage, à défaut de quoi il y aura obstacle à une véritable assimilation.

Voici en quels termes Astolfi et Develay (1989) considèrent l'importance des représentations dans le processus d'apprentissage :

«Le point de départ de l'idée de représentation est devenu classique depuis les travaux de Bachelard, Piaget, Bruner... C'est que tout apprentissage vient interférer avec un "déjà-là" conceptuel qui, même s'il est faux sur le plan scientifique, sert de système d'explication efficace et fonctionnel pour l'apprenant. [...] Enseigner un concept de biologie, physique ou chimie, ne peut plus se limiter à un apport d'informations et de structures intellectuelles correspondant à l'état de la science du moment, même si celles-ci sont éminemment nécessaires. Car ces données ne se-

ront efficacement intégrées par l'apprenant que si elles parviennent à transformer durablement ses préconceptions. Autrement dit, un véritable apprentissage scientifique se définit au moins autant par les transformations conceptuelles qu'il produit chez l'individu que par le produit de savoir qui lui est dispensé» (p. 31-32).

Giordan et De Vecchi (1987) tiennent des propos semblables à cet égard :

« Si l'on ne tient pas compte d'elles [des représentations], on aboutit semble-t-il à la coexistence chez les élèves de deux systèmes explicatifs parallèles, n'ayant pas prise l'un sur l'autre : l'un est utilisé dans les situations de classe étroitement orientées par le professeur, l'autre resurgit avec ténacité lorsque la situation change. Le premier reste trop verbal et mécanique pour pouvoir être réinvesti dans d'autres contextes que l'école, de telle sorte que le second se révèle plus opérationnel pour l'enfant. De plus, elles conduisent à faire dévier de leur sens le discours du maître et les explications qu'il donne. Les différents éléments sont réinterprétés par chacun en fonction de sa logique individuelle, de son expérience antérieure et des résonances affectives qui sont provoquées chez lui. Le maître et l'élève se trouvent ainsi bien souvent sur des registres totalement différents » (p. 35).

2.9. CONCLUSION

Le phénomène des fausses représentations des étudiants est tout à la fois complexe et largement répandu. Il pose de sérieuses difficultés à l'acquisition de concepts conformes au savoir techno-scientifique. Les conceptions ne sont pas de simples images ou représentations mentales, mais bien des indices d'un modèle explicatif sous-jacent qui fait partie des assises conceptuelles et des fondements épistémologiques de l'individu. Aussi, nous dirons avec Giordan et De Vecchi qu'«acquérir une connaissance, c'est passer d'une conception préalable à une autre plus pertinente par rapport à la situation» (p. 92).

Particulièrement dans le domaine de l'enseignement techno-scientifique, les difficultés causées par les fausses représentations des étudiants ont une incidence potentielle importante sur plusieurs difficultés d'apprentissage, dans la mesure où elles interviennent dans

les modèles explicatifs des fonctions technologiques. Le travail d'un technicien consiste, en premier lieu, à appliquer des technologies connues et à les adapter à des situations diverses, ou encore à proposer des solutions alternatives ou des mesures susceptibles d'optimiser une situation existante. La richesse et la qualité de la structure conceptuelle qu'il mettra alors à contribution déterminera fortement la qualité des applications qui en résulteront. Il reste à déterminer la place et le traitement qu'il convient d'accorder au problème des fausses représentations dans les activités d'apprentissage.

Mais, comment peut-on tenir compte des représentations des élèves lors de la mise en oeuvre de stratégies d'apprentissage correctrices ? Ou encore, peut-on envisager des stratégies adaptées à chaque type principal de représentation informelle ? Peut-on, en somme, en supposant que l'on ait bien diagnostiqué les problèmes conceptuels d'un groupe d'élèves, prescrire une démarche adaptée aux cas individuels et susceptible de redresser ces représentations ? Nous abordons ces questions à la section suivante.

3. LE MODÈLE CONSTRUCTIVISTE DE L'APPRENTISSAGE

De multiples travaux, dont les nôtres, ont mis en évidence l'incapacité des étudiants à expliquer le comportement de situations expérimentales simples, et ce, pour des raisons reliées directement aux représentations qu'ils mettent à contribution. La problématique ne saurait pas se résumer à pointer du doigt quelques déviations ou hérésies dans les représentations des étudiants par rapport aux canons scientifiques, mais bel et bien de constater la non viabilité de ces représentations face aux réalités fonctionnelles des systèmes.

Comme nous le disions précédemment, particulièrement en enseignement technologique, les étudiants sont confrontés à des situations expérimentales concrètes et, lorsque les représentations conceptuelles qu'ils mettent en oeuvre sont inopérantes, les conséquences sont observables. Dès lors, la question centrale est de savoir quelle serait la meilleure fa-

çon de rendre les étudiants conscients du fait que leurs représentations sont inopérantes ? Comment rendre ces faits observables et comment, à travers ces observations, peut-on optimiser les conditions d'apprentissage afin qu'ils se rendent compte de la nécessité de faire évoluer leurs conceptions ?

Le courant constructiviste de l'apprentissage inspiré des travaux de Piaget (1964), Ausubel (1968), Laszlo (1969) et Posnet et al. (1982) apporte des éléments de réponse à ces questions. Selon cette conception, les apprentissages se construisent à partir des interactions qui se créent entre le sujet connaissant et l'objet de connaissance. De la richesse de ces interactions découle celle des apprentissages qui seront réalisés.

Selon Piaget, au cours des interactions, il se crée des situations de déséquilibre cognitif chez le sujet. Celui-ci se trouvant alors en état de questionnement, réagit en vue du rétablissement de l'état d'équilibre. C'est ainsi que Piaget exprime le phénomène:

« A chaque instant, pourrait-on dire ainsi, l'action est déséquilibrée par les transformations qui surgissent dans le monde, extérieur ou intérieur, et chaque conduite nouvelle consiste non seulement à rétablir l'équilibre, mais encore à tendre vers un équilibre plus stable que celui de l'état antérieur à cette perturbation ».

Selon Piaget, le rétablissement de l'équilibre implique deux mécanismes indissociables : l'assimilation et l'accommodation. L'assimilation désigne l'intégration de nouvelles données dans un schème existant. Elle s'accompagne de l'accommodation, qui désigne toute adaptation d'un schème d'assimilation aux conditions d'une situation particulière.

3.1 LE CONFLIT CONCEPTUEL

Dans un courant de pensée complémentaire se situent Posner et al. qui, cependant, expliquent autrement les notions d'assimilation et d'accommodation. Pour ces auteurs, tout nouvel apprentissage s'intègre de façon harmonieuse si la structure conceptuelle de l'apprenant existe déjà. Dans le cas contraire, il doit se produire un réaménagement des postulats épistémologiques et, subséquemment, une réorganisation de la structure conceptuelle. Il s'agit de constater que les nouvelles conceptions s'inscrivent en rupture épistémologique par rapport aux précédentes et qu'il faut procéder à un changement de paradigme, au sens de Kuhn (1970). C'est la situation de conflit conceptuel, au cours de laquelle l'apprenant réalise que ses représentations ne peuvent pas s'accommoder des nouvelles notions qui lui sont proposées. Durant cette phase il devient perméable à un changement de sa structure conceptuelle qui lui permettra de concilier la nouvelle situation avec ses expériences passées. Mais, dans quelles circonstances l'apprenant opère-t-il un réaménagement de sa structure conceptuelle ? Selon ces auteurs, il faut :

- 1- que l'apprenant prenne conscience de l'incapacité de ses représentations à expliquer la situation observée,
- 2- qu'il puisse entrevoir une nouvelle façon de concevoir la situation,
- 3- que cette nouvelle façon lui paraisse plausible et accessible et,
- 4- que cette nouvelle représentation lui laisse entrevoir des répercussions sur d'autres situations qu'il a déjà expérimentées, sans toutefois se les expliquer de manière satisfaisante, et qui l'inciteront à vérifier de nouvelles hypothèses.

Sur un plan plus opérationnel, Giordan et De Vecchi (1987) explicitent les conditions à observer lorsqu'on veut faire apprendre «avec» et «contre» les représentations des élèves:

Premièrement, *« c'est l'apprenant qui «construit» son savoir. C'est donc lui [...] qui doit se trouver en situation de changer de représentation. [...] le formateur ne peut ni fournir les*

conceptions adéquates, ni agir sur les représentations [...] s'il n'amène pas l'élève à prendre conscience, par lui-même, de la nécessité d'opérer ces révisions ».

Deuxièmement, « *c'est par une série de corrections, de rectifications successives, que l'apprenant peut accéder à un certain niveau de formulation plus adéquat (ou plus proche du savoir scientifique) ».*

Troisièmement, « *les conceptions de l'apprenant ne correspondent pas uniquement à des images de la réalité; elles lui servent de point d'ancrage pour s'approprier d'autres savoirs, car elles constituent les «structures d'accueil» qui permettent de fédérer de nouvelles informations ».*

Finalement, « *la nouvelle connaissance doit être «intégrée» aux structures préexistantes dont dispose l'apprenant ».*

Ici, les auteurs rejoignent la pensée de Posner et al. lorsqu'ils affirment: « *Il nous semble nécessaire de parler de véritable « mutation ». Un élément nouveau ne s'inscrit pas dans la ligne de connaissances antérieures; celles-ci représentent le plus souvent un obstacle à son intégration et il faut donc une transformation intellectuelle pour combler ce décalage ».*

La figure 2 ci-contre illustre globalement le modèle constructiviste du phénomène de l'apprentissage ainsi que les mécanismes d'assimilation et d'accommodation qui résultent du conflit conceptuel selon Posner et al. Ce modèle a fait l'objet de nombreux travaux dans le domaine des sciences. Hewson et Hewson (1983) ont travaillé au développement de stratégies reliées aux concepts de masse et de densité. Lafontaine et al. (1990) ont traité des concepts d'hydrodynamique, tandis que Dupin et Johsua (1989) l'ont fait en électrocinétique.

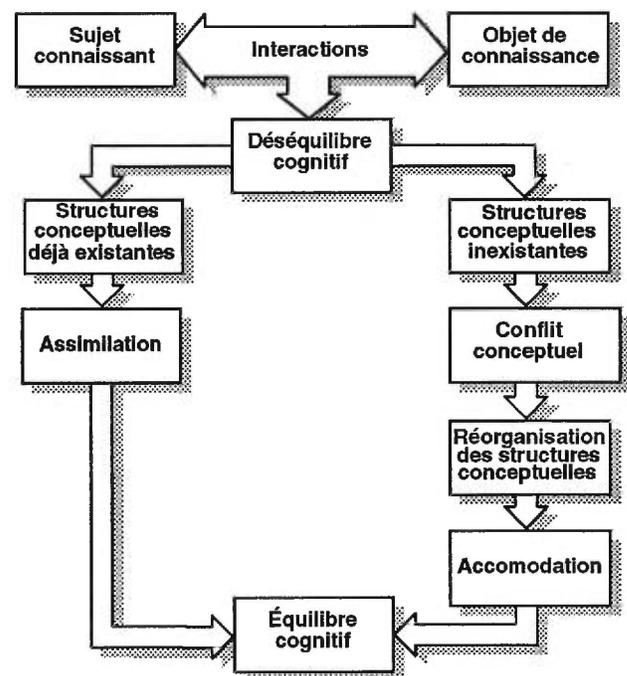


Figure 2 Modèle constructiviste du phénomène de l'apprentissage

Plus récemment, Astolfi (1992) propose d'articuler les activités d'apprentissage en s'inspirant du schéma fonctionnel de Peterfalvi et al. (1992) qu'il illustre à travers l'exemple de la figure 3 concernant la représentation voulant que les gaz ne soient pas de la matière :

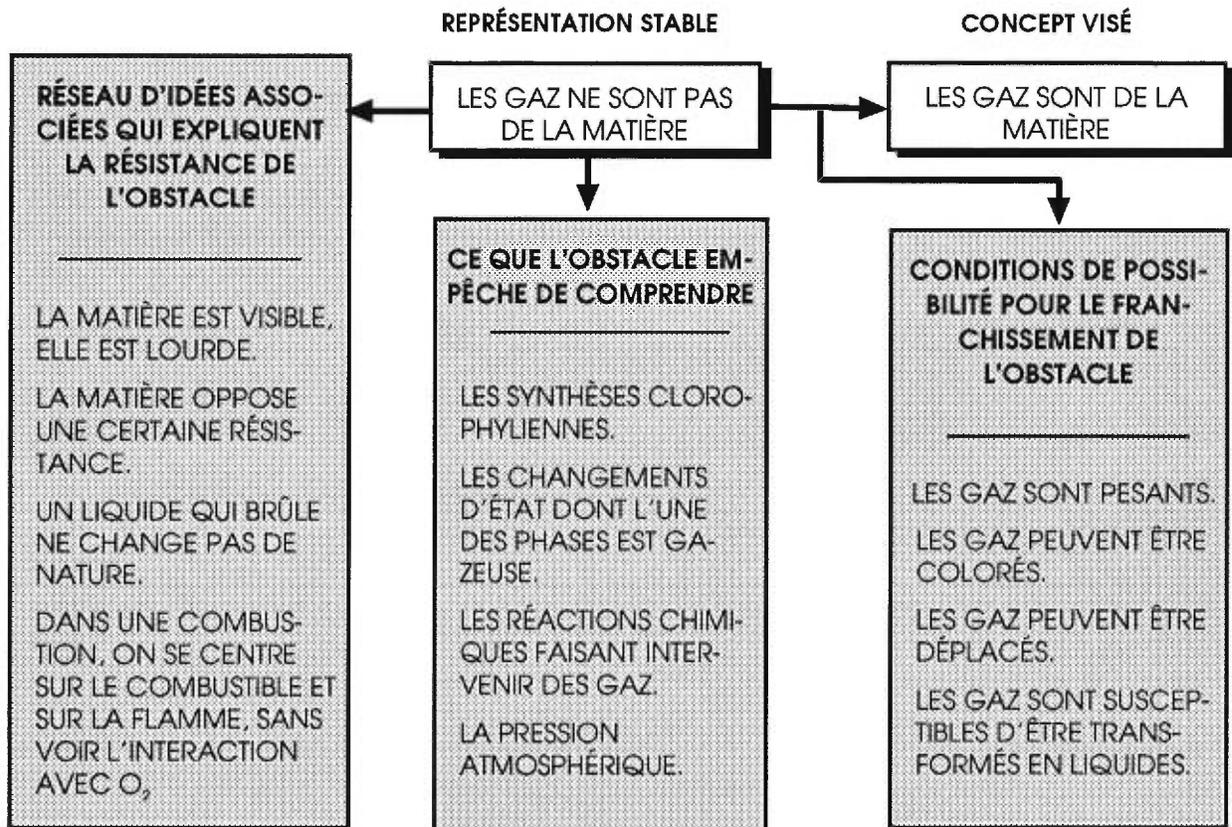


Figure 3. Exemple d'application du schéma fonctionnel de Peterfalvi

À partir de ce schéma, l'auteur distingue les étapes suivantes :

- [1] *La représentation stable, qui fait obstacle à l'apprentissage : ici, l'idée que les gaz ne sont pas de la matière.*
- [2] *Le concept visé, qui en est le contrepoids logique (les gaz sont de la matière).*
- [3] *Ce que l'obstacle empêche de comprendre, c'est-à-dire ce à quoi la représentation fait vraiment obstacle du point de vue conceptuel. Par exemple, le fait que les végétaux puissent construire leur matière à partir du CO_2 atmosphérique, difficilement envisagé comme une «nourriture».*

[4] *Le réseau d'idées associées, qui expliquent la résistance de la représentation et justifient que l'élève n'abandonne pas facilement son idée au profit de celle qui lui est enseignée. Par exemple, l'idée que la matière est quelque chose de visible, de lourd, qui oppose une certaine résistance. [...]*

[5] *Les conditions de possibilité à créer pour que la représentation évolue, pour que l'obstacle soit franchi. Par exemple, créer de nouvelles situations expérimentales qui permettront de conférer aux gaz certaines des propriétés admises pour la matière [...].*

Astolfi explique ainsi le mécanisme sous-jacent ce modèle :

« Ce qui conduit le processus d'apprentissage à une sorte de « dialogue de sourds », c'est que l'enseignant est centré sur le concept à acquérir [2] et voit d'abord les représentations des élèves [1] comme ce qui s'oppose à la réussite de son projet [3]. Pour l'élève, au contraire, ces mêmes représentations [1], plus ou moins conscientisées, constituent les outils intellectuels avec lesquels il pense, et il les conservera tant qu'il leur accordera une valeur explicative [4] supérieure au concept visé [2]. C'est en réalité la centration de l'enseignant sur le point [5] qui peut conduire à débloquent la situation [...] » (p. 97-98).

3.2. L'APPROCHE D'EXPÉRIMENTATION ET DE MODÉLISATION EN SIMULATION

Les modèles constructiviste et du conflit conceptuel sont indissociables d'une approche didactique d'expérimentation consistant à placer l'apprenant en situation de construire ses connaissances à partir des interactions qu'il établit avec l'objet de connaissance. Lorsque ces expérimentations sont riches et abondantes, lorsqu'elles conduisent à l'étude des liens de cause à effet et à la compréhension du comportement de l'objet de connaissance et des paramètres qui l'influencent, on peut dire que l'étudiant est engagé dans une démarche de modélisation.

Telle est notre orientation didactique consistant à faire réaliser à l'étudiant un grand nombre d'expérimentations dans un environnement de simulation assistée par ordinateur.

D'une part, nous plaçons l'apprenant dans un contexte d'interaction avec les systèmes technologiques, dans une situation dynamique de résolution de problèmes qui l'incite à interagir avec les situations, à observer leur comportement, à se poser des questions, à expérimenter et à formuler des réponses (Cervera et al. 1992 ; Cervera et Nonnon, 1993).

D'autre part, nous lui donnons des moyens pour qu'il puisse créer, configurer et modifier des situations expérimentales, les mettre à l'essai et explorer des hypothèses de fonctionnement en regard de modèles explicatifs interactifs qui rendent intelligibles les interactions entre les variables. Cette approche rejoint celle de la «*lunette cognitive*» (Nonnon, 1988) utilisée en robotique pédagogique pour l'enseignement des sciences.

Cette approche est principalement inductive, en ce sens qu'elle part de l'observation du comportement réel (simulé) et, au moyen de questionnements et d'expérimentations, elle conduit l'apprenant à se construire une interprétation de ce comportement et à la découverte des modèles explicatifs qui le sous-tendent. Par le fait même, l'apprenant est appelé à confronter et à reconsidérer ses propres représentations en regard de ces modèles explicatifs ; «*une représentation c'est un modèle explicatif* » (De Vecchi, 1987, p. 223). Cette approche inductive est complémentaire à la démarche déductive, plus traditionnelle, consistant à partir de l'interprétation théorique et de l'analyse d'une situation. Malheureusement, cette dernière règne presque exclusivement dans les salles de classe ; plutôt que de les opposer l'une à l'autre, Nonnon (1988) préconise un meilleur équilibre entre les deux pour favoriser l'enrichissement des apprentissages. Nous partageons cette optique et estimons qu'une démarche complémentaire à caractère déductif peut être utile et nécessaire, particulièrement dans les circonstances où l'apprenant n'arriverait pas à «*décoder*» et à interpréter de manière suffisamment cohérente le comportement d'une situation expérimentale ; il pourra ainsi compléter et accélérer l'approche inductive, afin de mieux se construire une interprétation qu'il pourra, par la suite, confronter en regard du comportement expérimental.

3.3. L'APPROCHE SYSTÉMIQUE

Au chapitre I traitant de la problématique, nous disions que, du point de vue épistémologique, l'approche d'enseignement traditionnel de l'énergie des fluides est essentiellement basée sur l'étude des composants, ce qui ne permet pas de rendre compte des interactions qui se produisent dans les systèmes. Par opposition, une approche systémique, au sens de De Rosnay (1975), Le Moigne (1977) et Walliser (1977), nous semble d'avantage susceptible de rendre compte de la fonction globale des systèmes.

En effet, la complexité croissante des systèmes technologiques, particulièrement depuis une vingtaine d'années, a mis en évidence la nécessité de se doter d'outils intégrateurs qui favorisent le développement de structures conceptuelles transdisciplinaires, orientées et structurées en fonction des tâches de travail, et qui permettent de combler le fossé qui existe entre plusieurs sciences et techniques qui concourent en un même objet technique. Plusieurs éléments de réponse à cette problématique sont apportés par l'approche systémique. Il s'agit d'une approche globale de la fonctionnalité des systèmes. Ainsi, des concepts utilisés spécifiquement dans le cadre d'une discipline, deviennent transférables à des disciplines de nature apparemment très hétérogène. Des concepts tels que fonction globale, frontière, frontière restreinte, homogénéité, entrée-sortie, action et état, état interne, milieux associés, énergie-matière-information, schéma fonctionnel, liaisons et degrés de liberté, relation d'ordre, circuit et système, permettent d'étudier les interactions entre divers domaines de la science et de la technique.

Joël De Rosnay (1975), par son ouvrage *Le macroscope*, est probablement l'auteur d'expression française le plus fréquemment cité dans ce domaine. D'autres auteurs (notamment Le Moigne, 1977, Walliser, 1977 et Durand, 1979) ont aussi contribué à préciser ce concept général et à développer certains domaines d'application. Cette approche

systemique constitue aujourd'hui l'outil le plus prometteur permettant d'échapper à la dissection de la démarche scientifique, à son morcellement analytique, et d'étudier les systèmes dans la globalité complexe des interactions qui s'y produisent. Afin de mieux cerner en quoi l'approche systémique est différente de la méthode scientifique, nous reproduisons le tableau comparatif suivant tiré de De Rosnay (1975), (p.108)

APPROCHE ANALYTIQUE	APPROCHE SYSTÉMIQUE
Isole : se concentre sur les éléments.	Relie : se concentre sur les interactions entre les éléments.
Considère la nature des interactions.	Considère les effets des interactions.
S'appuie sur la précision des détails.	S'appuie sur la perception globale.
Modifie une variable à la fois.	Modifie des groupes de variables simultanément.
Indépendante de la durée : les phénomènes considérés sont réversibles.	Intègre la durée et l'irréversibilité.
La validation des faits se réalise par la preuve expérimentale dans le cadre d'une théorie.	La validation des faits se réalise par comparaison du fonctionnement du modèle avec la réalité.
Modèles précis et détaillés, mais difficilement utilisables dans l'action [...].	Modèles insuffisamment rigoureux pour servir de base aux connaissances, mais utilisables dans la décision et l'action [...].
Approche efficace lorsque les interactions sont linéaires et faibles.	Approche efficace lorsque les interactions sont non linéaires et fortes.
Conduit à un enseignement par discipline (juxtadisciplinaire)	Conduit à un enseignement pluridisciplinaire.
Conduit à une action programmée dans son détail.	Conduit à une action par objectifs.
Connaissance des détails, buts mal définis.	Connaissance des buts, détails flous.

Tableau IV. Différences entre l'approche systémique et la méthode scientifique.

Comme le fait remarquer De Rosnay, « *l'approche analytique et l'approche systémique sont plus complémentaires qu'opposées. Mais pourtant irréductibles l'une à l'autre [...]. Sans être exhaustif, ce tableau a l'avantage de situer deux approches complémentaires, mais*

dont l'une (l'approche analytique) a été favorisée de manière presque disproportionnée dans tout notre enseignement » (p.107-108).

Pour illustrer l'intérêt de l'approche systémique et en dégager ses principales caractéristiques, Laroche et al. (1991) proposent la métaphore de l'étranger dans une nouvelle ville à connaître :

« Pour se familiariser avec une ville étrangère, le meilleur moyen consiste à en faire le tour, et dans un premier temps, à identifier quelques points de repères importants. Ensuite, on explore plus en détail et on augmente le nombre de points de repères. Très rapidement, on s'y sent à l'aise ; on ne connaît que le centième des rues de la ville, et pourtant, on peut déjà éviter de s'y perdre. [...] En suivant l'approche traditionnelle, on apprendrait le nom de la plupart des rues, la forme des bâtiments et leurs adresses, avant de tenter une première traversée de la ville » (p. 7).

Ces auteurs remarquent que l'approche systémique implique une progression descendante, par approximations successives, qui vont du général au particulier, et du global au détail. Elle s'intéresse aux détails d'une manière sélective : *« L'étranger qui doit voyager fréquemment du point A au point B apprendra très vite les chemins et les points de repères entre A et B » (p. 8).*

Les auteurs soulignent aussi le fait que les connaissances sont organisées en regard des tâches à accomplir. Ainsi, *« l'étranger dans la ville ne s'intéresse pas particulièrement aux problèmes d'aqueducs ni d'égouts ; les rues lui servent à circuler, et l'utilité de la rue X, c'est de déboucher sur la rue Y, où se trouve le point B » (p. 8).*

L'ordre du questionnement dans l'approche systémique est inversé par rapport à l'ordre traditionnel, ce qui constitue aussi une de ses caractéristiques (p. 9) :

- À quoi sert-il ? (utilité)

- *À quoi cela ressemble-t-il, en gros ? (aspect général)*
- *Quelles sont les entrées et les sorties, et comment les sorties sont-elles reliées aux entrées sur le plan fonctionnel ? (aspect fonctionnel)*
- *Comment cela fonctionne-t-il à l'intérieur ? (principes physiques qui sous-tendent le fonctionnement interne).*

Cette inversion de l'ordre du questionnement de la technique par rapport à celle de la science correspond aux finalités de la technologie et à la démarche de l'expert : ses problèmes sont pratiques et appliqués (construire, installer, réparer...) ; les solutions sont surtout d'ordre disciplinaire et théorique.

De cette inversion de l'ordre de questionnement découle une autre caractéristique importante de l'approche système selon laquelle tout concept doit d'abord être maîtrisé au plan qualitatif, avant que l'aspect quantitatif ne soit considéré. Ainsi, De Kleer (1984) estime : « *an engineer does not perform a quantitative analysis unless he first understands the circuit [ou le système] at a qualitative level* ». Nous avons expérimenté l'importance de cette question, particulièrement lors des entrevues cliniques pratiquées auprès des étudiants, à l'occasion de nos travaux visant à caractériser leurs représentations conceptuelles. De plus, cet aspect est étroitement relié à notre problématique des représentations alors que, nous l'avons dit, les difficultés des étudiants se situent surtout au plan qualitatif. Voici en quels termes White et Fredericksen (1990) perçoivent cet aspect en ce qui concerne son application dans l'enseignement :

« [...] students should initially be exposed to qualitative causal reasoning in order (1) to make connections with their naïve intuitive models of physical phenomena, and (2) to enable them to acquire this important problem-solving skill that evidence has shown they lack. Quantitative reasoning should only be introduced after students have been given a qualitative, causal conception of the domain, and the form of

quantitative reasoning then taught should be a logical extension of the qualitative reasoning they have acquired » (p. 102).

Lévy-Leblond (1980) s'exprime de manière semblable à ce sujet :

« Avant toute analyse théorique d'un problème physique (mise en équations, résolution formelle, calculs numériques), une étude qualitative préalable en est absolument nécessaire. Évaluation empirique des paramètres d'importance dans le problème, utilisation fonctionnelle des lois physiques ou de la simple analyse dimensionnelle pour étudier la dépendance mutuelle des quantités physiques considérées, estimation des ordres de grandeur correspondants, telles sont les formes principales de cette démarche préliminaire. [...] Il s'agit ici d'essayer d'obliger l'étudiant (et l'enseignant !) à penser, en lui supprimant le recours automatique aux « équations ». Ce n'est pas dire, certes, que les lois physiques traduites par ces équations soient inutiles pour répondre à ces questions, bien au contraire, dans la mesure où beaucoup de réponses vont à l'encontre du « sens commun » ordinaire, ou lui sont étrangères. Mais les lois à utiliser traduisent des relations entre concepts suffisamment simples (dépendance proportionnelle, inverse, indépendance, etc.) pour pouvoir, et devoir, être mises en oeuvre sans qu'il soit besoin de « résoudre des équations » même s'il est parfois (mais rarement) utile de les écrire » (p. 7-8).

En dernier lieu, De Rosnay décrit l'approche systémique comme étant une vision qui permet de gérer la complexité. Il estime que le premier pas vers la connaissance d'un système complexe, c'est de savoir précisément ce que l'on peut en ignorer. Il en découle les concepts d'encapsulation et de modularité qui sont employés à grande échelle, particulièrement dans le domaine de l'électronique et de l'informatique. Comme le remarquent Chabal et al. (1973),

« Tout objet mécanique [ou d'autre nature, dirions nous] peut être considéré comme une « boîte noire » caractérisée par des entrées et des sorties au niveau de la matière d'oeuvre » (p. 6).

La «boîte noire» représente un sous-système dont on possède une description incomplète mais dont on connaît les caractéristiques fonctionnelles suffisantes pour l'application envisagée. Nous rejoignons ici le concept central de modélisation : Walliser (1977) définit l'approche systémique comme étant une approche de modélisation :

« Le concept de système est, en fait, inséparable du concept de modèle, conçu comme système représentatif d'un système concret. Tout système réel n'est connu, en effet, qu'à travers des modèles représentatifs (représentations mentales individuelles ou représentations explicitées formellement). Inversement, tout modèle peut être considéré comme un système spécifique, qu'il soit de nature concrète (maquette) ou abstraite (ensemble de signes) » (p.11).

La question de la modélisation soulève aussi la problématique de la méthode scientifique et de l'approche pratiquée dans les domaines technologiques. La méthode scientifique, tout en étant très rigoureuse, ne correspond pas à la manière naturelle d'apprendre. ; aussi, elle est difficilement praticable dans un contexte scolaire. De plus, Il ne faudrait pas perdre de vue que *« ce qu'on demande aux élèves n'est pas d'agir comme un théoricien qui produit, de manière rigoureuse, du savoir mais plutôt comme un praticien qui produit, de manière efficace, une solution [...] »* (Balacheff (1986), dans Larochelle et Désautels (1992), p. 75).

Dans les pratiques actuelles de l'enseignement des sciences et des techniques, le questionnement de l'élève est court-circuité, ce qui a pour effet de transformer les sciences expérimentales en sciences exactes. À ce propos, Giordan (1978) observe que l'élève *« ne recommence pas une expérience. Quand l'expérience contredit ce qu'il pense, c'est qu'elle est mauvaise : il s'en désintéresse »* (p.71).

Selon toute évidence, il faut repenser la pratique de ces enseignements car, comme le constate Nonnon (1986),

« il semblerait [...] que les activités propres à susciter un savoir-faire et une initiative dans les expériences de laboratoire soient, pour des soucis d'efficacité, réduites à des démonstrations par le professeur ou, dans le meilleur des cas, à la reproduction systématique d'expériences par l'élève, l'activité de ce dernier se limitant souvent à la saisie de données et à leur compilation. [...] Nous constatons que les méthodes déductives traditionnelles [...] ne semblent soulever d'enthousiasme ni chez les élèves ni chez les professeurs. Par contre, les méthodes inductives qui engagent l'élève dans une activité personnelle guidée en laboratoire seraient propices à susciter chez lui un goût véritable pour les sciences » (p. 7-8).

Aussi, nous adhérons aux propos de Nonnon lorsqu'il affirme :

« [...] il importe de ne pas donner la stratégie a priori comme une règle ; il faut permettre le tâtonnement, le retour en arrière, la réorganisation de l'expérience. Par cette façon de procéder, nous voulons favoriser la construction, l'élaboration graduelle, l'émergence de la stratégie ou à tout le moins son appropriation par l'élève » (p.12).

3.4. LA SIMULATION ASSISTÉE PAR ORDINATEUR

Des diverses considérations théoriques que nous venons d'exposer, nous dégageons les principaux aspects suivants :

- 1- C'est l'apprenant qui doit faire ses expérimentations et ses recherches, puis en tirer ses conséquences et ses découvertes. Ceci ne veut pas dire qu'il est laissé à lui-même, sans support théorique, bien au contraire, mais plutôt que c'est en réponse à ses questionnements que doivent s'inscrire les activités d'apprentissage.
- 2- L'apprenant qui conserve des représentations erronées se trouvera face à des situations expérimentales qu'il ne parviendra pas à résoudre. Paradoxalement, c'est cette situation de conflit conceptuel qui l'amènera à expérimenter toutes les hypothèses susceptibles de préserver dans son esprit la validité de ses conceptions, et qui va fina-

lement le déstabiliser et le rendre perméable à de nouvelles manières d'entrevoir la situation.

3- Ces nouvelles manières devront faire leurs preuves avant de devenir des candidates sérieuses et crédibles au remplacement des anciennes. Là encore, de nouvelles expérimentations devront avoir lieu, afin que l'apprenant développe une certaine maîtrise et une aisance avec la nouvelle façon de voir et de faire.

4- Dans ses expérimentations, l'élève doit pouvoir découvrir, questionner, tenter de mettre en échec et valider les modèles explicatifs et les représentations qui les sous-tendent.

Il en découle que la démarche expérimentale que nous nous proposons de créer est fort complexe ; elle fait appel à la contribution de nombreux éléments et à l'observation de plusieurs conditions. Elle doit permettre à l'apprenant d'expérimenter rapidement ses propres hypothèses et d'obtenir des résultats faciles à analyser de manière à ce qu'il puisse tirer des conclusions et les réinvestir continuellement dans de nouvelles expérimentations ; la rétroaction doit être accessible au fil du déroulement de ses expérimentations et intégrée dans le processus d'apprentissage. La diversité des situations, et les multiples variantes auxquelles le cheminement de l'apprenant donnera naissance, demande aussi que le passage de l'une à l'autre se fasse très aisément et rapidement sous peine de tarir la continuité de l'intérêt expérimental. Le contexte d'apprentissage doit faire appel aux modèles explicatifs formels et l'étudiant doit pouvoir y intervenir directement pour configurer l'expérimentation et pour comprendre les interactions entre les variables. Aussi, il doit pouvoir expérimenter des situations qui font intervenir des phénomènes qui échappent à l'observation directe, tels l'effet du vide dans un vérin ou l'évolution de la relation pression-volume lors du remplissage d'un accumulateur. Il faut rendre ces phénomènes explicites, observables et, surtout, sujets à l'expérimentation.

Les conditions que nous venons de décrire sont pratiquement impossibles à satisfaire dans un contexte d'enseignement traditionnel. Les situations que l'on peut créer en laboratoire demandent beaucoup trop de temps et sont nécessairement très limitées quant à la diversité. De plus, certaines situations critiques ne peuvent pas être expérimentées en raison des dangers inhérents, tels la perte de contrôle d'une charge. D'autres situations font appel, en première approche, à un contexte «idéalisé», comme l'absence de frottement, ce qui est impossible à réaliser avec un système physique. Enfin, il est pratiquement impossible aussi de faire varier à volonté les paramètres d'une configuration expérimentale donnée, tels les surfaces ou la course d'un vérin, ou encore d'utiliser des charges et des pressions élevées afin de vérifier son comportement dans des conditions critiques ou même dangereuses. L'importance de ces limitations fait en sorte que bon nombre d'étudiants perdent le fil de l'objectif poursuivi par l'expérimentation et l'intérêt qu'elle est censée susciter ; ces limitations seraient, selon nous, les principales sources d'inhibition face à tout éventuel questionnement de l'étudiant. Les travaux de laboratoire deviennent ainsi, trop souvent, des séances où l'apprenant se limite à appliquer des recettes et des modes opératoires qui le conduisent à une réponse, toute trouvée d'avance, à une question qui n'intéresse que son enseignant.

Nous constatons que la mise en oeuvre de toutes les conditions évoquées correspond, à plusieurs égards, à celles que l'on rencontre dans les systèmes-experts. Comme le dit Giardina, (1992), ce type d'environnement,

« est basé sur l'idée que la façon la plus naturelle d'apprendre est de faire des choses, de résoudre des problèmes. Dans des environnements interactifs, l'enseignement prend souvent la forme de simulation ou de résolution de problèmes [...]. L'environnement multimédia devient un laboratoire où l'apprenant peut manipuler, ob-

server, changer des données, tester des hypothèses.[...] Limiter ces possibilités peut vouloir dire limiter la nature même de l'apprentissage »

Toutes ces raisons nous amènent à conclure que l'outil par excellence, sinon indispensable dans ce contexte est l'ordinateur. Nous sommes d'avis qu'un environnement d'apprentissage qui permettrait l'expérimentation selon une démarche de modélisation en simulation par ordinateur et qui satisferait aux conditions exposées, serait des plus propices à faire cheminer les élèves dans le sens de nos préoccupations.

La démarche intellectuelle que doit faire l'apprenant pour construire et pour faire évoluer ses représentations est exigeante. Elle fait appel à une richesse expérimentale qui dépasse celle des situations que l'on peut créer avec les moyens traditionnels. Le contexte d'apprentissage que sous-tend notre problématique ne saurait pas se limiter à faire acquérir de nouvelles connaissances. Il s'agit, le plus souvent, de redresser, de transformer et de faire abandonner les représentations antérieures qui se dressent comme de vrais obstacles pédagogiques, et qui sont profondément ancrées dans la structure conceptuelle de l'apprenant.

Cela ne veut pas dire que nous proposons un apprentissage centré uniquement sur un système informatisé, si flexible soit-il, où l'enseignant n'aurait qu'un rôle limité. Nous pensons plutôt qu'il convient de proposer un ensemble de situations d'apprentissage construites en fonction des représentations des apprenants et qui permettront à ceux-ci de faire un cheminement structuré et le plus autonome possible, basé sur des expérimentations qu'ils effectueront en regard des modèles explicatifs des systèmes. Selon notre optique, il y a toujours une place importante pour l'enseignement plus traditionnel, particulièrement dans la mesure où certaines informations de base, des mises en situation ou des contenus théoriques peuvent, à un moment ou un autre, passer avantageusement par d'autres moyens. Nous sommes conscients, par ailleurs, qu'une conception trop linéaire et trop rigide d'un tel

environnement d'apprentissage, constituerait la meilleure garantie de rejet, autant de la part des apprenants que des enseignants. C'est pourquoi nous le percevons davantage comme un moyen particulièrement riche et privilégié de supporter autant les apprentissages que les enseignements.

CHAPITRE V

OPÉRATIONNALISATION DE L'IDÉE : ÉLABORATION D'UN MODÈLE D'ACTION PÉDAGOGIQUE

1. INTRODUCTION

Nous abordons dans ce chapitre la question de l'opérationnalisation de l'idée, c'est-à-dire de l'élaboration du modèle d'action au moyen duquel nous allons définir l'ensemble des spécifications pédagogiques et technologiques auxquelles devrait satisfaire l'environnement d'apprentissage qui est au coeur de nos travaux. Ce modèle d'action prendra ici la double forme d'un bref condensé du devis pédagogique et du cahier de charges qui ont servi de référence lors de la réalisation proprement dite du prototype de l'environnement d'apprentissage.

Rappelons que cet environnement vise à favoriser l'apprentissage des systèmes d'énergie des fluides selon une approche constructiviste et interactionniste, d'où le recours abondant à l'expérimentation. Aussi, les considérations théoriques exposées au chapitre III nous ont conduit à adopter une approche systémique de modélisation didactique. Nous avons aussi justifié le bien fondé du choix de l'ordinateur comme moyen pour optimiser cet environnement. Nous exposerons maintenant la manière selon laquelle ces grandes lignes seront prises en considération. Nous diviserons l'exposé en deux volets. Le premier traitera des aspects essentiellement pédagogiques ; on y définira ce que l'étudiant doit pouvoir y faire et ce qu'il doit y retrouver, la manière de l'utiliser, etc. Le deuxième volet traitera des aspects technologiques, c'est-à-dire des fonctionnalités du logiciel de simulation sous-jacent à l'environnement d'apprentissage. Ce volet sera présenté dans une optique favorisant la réalisation informatique.

2. NATURE DE L'ENVIRONNEMENT D'APPRENTISSAGE

La vocation première de cet environnement est l'aide à l'enseignement et à l'apprentissage des systèmes hydrauliques et pneumatiques industriels de puissance. Son

orientation didactique s'inspire du paradigme constructiviste de l'apprentissage ; nous visons à placer l'étudiant dans une situation dynamique de résolution de problèmes qui l'incitera à interagir avec les systèmes, à se poser des questions, à les expérimenter et à formuler des réponses en regard de modèles explicatifs interactifs qui illustreront les relations entre les variables. Cet environnement fera abondamment appel à l'expérimentation en simulation et favorisera les apprentissages autonomes. Il s'adressera, pour l'essentiel, à une clientèle de niveau technique et professionnel. En d'autres mots, on s'intéressera à l'ensemble des connaissances, phénomènes et concepts qui sont mis à contribution lors d'interventions de nature technique reliées à l'implantation, à l'adaptation, à la maintenance, au dépannage et la réparation de tels systèmes. Au point 7 de ce même chapitre, nous expliciterons la nature de ces interventions techniques ; l'annexe I en présente une description détaillée).

3. BUT POURSUIVI

Le but poursuivi est de rendre observables et intelligibles, au moyen de simulations, les phénomènes qui se produisent dans les systèmes hydrauliques et pneumatiques industriels, afin de favoriser l'apprentissage de ces phénomènes, au niveau qualitatif et quantitatif, ainsi que des concepts qui les sous-tendent.

Cet environnement constituera un milieu d'expérimentation, une sorte de laboratoire virtuel, avec lequel l'étudiant pourra observer le fonctionnement des systèmes complets, c'est-à-dire en interaction avec des mécanismes usuels sur lesquels agiront diverses forces et charges. En plus de la simulation, il permettra la mise en oeuvre de stratégies d'apprentissage faisant appel à l'expérimentation selon une approche de modélisation. L'étudiant pourra ainsi réaliser des apprentissages de manière autonome ; il disposera de textes de théorie accompagnés de systèmes déjà construits avec lesquels il devra effectuer les expérimentations requises. L'environnement permettra aussi de réaliser des apprentis-

sages d'application et d'enrichissement au moyen d'une banque de problèmes à résoudre qui feront intervenir des systèmes déjà construits, ou que l'étudiant devra élaborer ou modifier, et qu'il pourra simuler pour expérimenter et vérifier ses réponses.

Il est clair toutefois que, dans sa forme de prototype que nous nous proposons d'élaborer dans le cadre de cette thèse, cet environnement d'apprentissage comportera un nombre restreint d'activités d'apprentissage, pour fins d'illustration ; il constituera un outil didactique qui permettra, aux enseignants qui le désirent, de mettre en oeuvre une démarche de modélisation. Les contenus des leçons ne seront donc pas inclus, mais les moyens pour les créer et les administrer le seront.

4. POPULATION ET COURS VISÉS

La population visée en priorité est celle du secteur technique de l'ordre collégial et, indirectement, celle du secteur professionnel du secondaire. Nous pensons aussi que les capacités de simulation de cet environnement pourront également intéresser une population universitaire. Cependant, nous visons spécifiquement et en toute priorité les étudiants du secteur de la *Technologie de la mécanique* inscrits aux cours reliés à l'hydraulique et à la pneumatique des deux programmes suivants : *241.05, Techniques d'analyse d'entretien* et *241.06, Techniques de génie mécanique*.

5. PLATE-FORME DE DÉVELOPPEMENT

Compte tenu de la population cible et des ordinateurs disponibles dans les institutions de formation professionnelle et technique, le logiciel devra fonctionner dans un environnement Windows, sur micro-ordinateur PC, compatible IBM. Le modèle cible sera le 486 car il est déjà largement diffusé et qu'il constitue la configuration de base pour l'ensemble des applications informatiques spécialisées (DAO / FAO, automatisation, robotique, etc.) dans

les programmes en question. Bien entendu, les modèles de la génération postérieure, Pentium 586, permettront aussi de faire fonctionner le logiciel.

6. SYSTÈME D'UNITÉS

L'étudiant devra pouvoir travailler, au choix, avec le système international d'unités ou avec l'impérial, et utiliser les unités de base ou ses multiples (exemple : la pression en pascal, kPa, MPa ou bar). Cette contrainte découle de la réalité du contexte de travail industriel des techniciens, où les deux systèmes d'unités se côtoient et continueront à le faire vraisemblablement encore pendant au moins une génération. Toutefois, dans un premier temps, le prototype utilisera seulement le système international d'unités.

7. TÂCHES, PHÉNOMÈNES ET CONCEPTS IMPLIQUÉS

Étant donné que la finalité didactique poursuivie est de rendre compte des phénomènes physiques qui se produisent dans les systèmes, afin de supporter l'apprentissage de ces phénomènes et des concepts qui sont mis à contribution lors d'interventions de nature technique, nous ferons ici état de la nature des interventions qui sont généralement dévolues aux techniciens de l'ordre collégial relativement aux systèmes en question. En ce sens, dans Cervera et al. (1993) nous avons dégagé les trois grands domaines d'intervention suivants pour les techniciens : 1) la conception, la modification et l'adaptation de systèmes d'énergie des fluides, 2) le montage, le réglage et la mise au point de systèmes et 3) l'entretien et la réparation de systèmes. À l'annexe I, nous présentons une analyse détaillée de ces trois grands domaines, tirée de ce document. Cette analyse comporte aussi une description succincte des apports attendus de notre environnement informatisé pour favoriser l'apprentissage de ces tâches, ainsi que d'une relation des principaux phénomènes, fonctions et concepts impliqués dont l'environnement d'apprentissage devrait rendre compte.

8. LES FONCTIONS GÉNÉRALES DE L'ENVIRONNEMENT D'APPRENTISSAGE

Pour opérationnaliser cet environnement d'apprentissage, nous nous proposons de construire un logiciel qui comportera deux volets : un simulateur, qui constituera l'essentiel du laboratoire virtuel d'expérimentation, et une banque de leçons et de situations expérimentales, qui permettra les apprentissages autonomes.

8.1. LE SIMULATEUR

Le but du simulateur est d'offrir à l'étudiant un environnement informatisé d'expérimentation avec lequel il pourra observer le fonctionnement des systèmes complets, c'est-à-dire des systèmes en interaction avec des mécanismes usuels, sur lesquels agiront diverses charges. L'étudiant pourra construire le système à partir des composants disponibles dans un menu, régler l'ensemble des paramètres, puis observer son comportement en temps réel, c'est-à-dire le mouvement des vérins, pompes et moteurs, le remplissage d'accumulateurs, le mouvement des mécanismes et des charges, l'état ouvert ou fermé des valves, les valeurs enregistrées par les appareils de mesure tels manomètre, débitmètre et thermomètre, ou encore, l'évolution et l'interaction des variables au moyen de graphiques.

Le simulateur permettra donc l'élaboration de systèmes complets à l'écran, puis de les simuler. Pour ce faire, l'étudiant sélectionnera dans un menu, à l'aide de la souris, les composants nécessaires et les disposera à l'écran, puis les reliera avec des conduits et raccords. Les composants se présenteront sous forme d'icônes et symboles normalisés qui constituent le langage icono-graphique d'usage dans la discipline. Les paramètres des composants seront réglables à l'intérieur de valeurs limites, avec des valeurs par défaut.

L'étudiant pourra choisir d'effectuer les simulations avec des composants «idéaux» ou «réels». Nous entendons par composant idéal (ou théorique) un composant imaginaire qui

répond exactement au rôle défini pour lui, c'est-à-dire dont le fonctionnement fait abstraction des effets parasites tels : frottement, viscosité, masse, inertie, saturation, non linéarité ; en somme, le composant qui répond au modèle explicatif de premier niveau. Par opposition, le composant réel est celui qui, dans la mesure des limites du simulateur, tient compte de ces effets parasites, lesquels s'expriment notamment au moyen de courbes caractéristiques empiriques.

8.2. LA BANQUE DE LEÇONS ET DE SITUATIONS EXPÉRIMENTALES

Le but de cette banque est d'offrir à l'étudiant un ensemble de situations lui permettant de réaliser des apprentissages autonomes d'application et d'enrichissement. Les situations feront intervenir des systèmes hydrauliques ou pneumatiques déjà construits, ou que l'étudiant devra élaborer ou modifier, et qu'il pourra simuler pour expérimenter et vérifier ses réponses. Les situations expérimentales pourront inclure des textes et des dessins ou des moyens pour les importer à partir de d'autres logiciels courants.

9. LES FONCTIONS DE REPRÉSENTATION DU SIMULATEUR

Nous entendons par «fonctions de représentation» ce que l'étudiant doit pouvoir observer à l'écran pendant les simulations. Elles découlent directement des tâches, des apports attendus du logiciel à cet égard et des aspects dont le simulateur doit rendre compte, tel que décrits à l'annexe I. Ces fonctions de représentation concernent :

- 1- Les états en régime stable des systèmes hydrauliques et pneumatiques sous l'effet de forces et vitesses constantes, c'est-à-dire :
 - 1.1. L'espace d'évolution position / vitesse des mouvements des vérins, des charges et des mécanismes.
 - 1.2. L'espace d'évolution volume / pression relatif au remplissage des accumulateurs.

- 1.3. La représentation du sens de rotation des pompes, des compresseurs et des moteurs, sommairement en rapport avec la vitesse de rotation.
 - 1.4. La représentation du symbole en position ouverte ou fermée des distributeurs, des clapets et des valves de pression.
- 2- Les états en régime transitoire des systèmes hydrauliques et pneumatiques, c'est-à-dire l'espace d'évolution position / vitesse décrit ci haut, pour les mêmes composants, sous l'effet des inerties qui résultent de l'accélération des masses, ainsi que les effets des charges menantes qui causent le vide dans le système. Cet aspect est particulièrement exigeant du point de vue technologique, essentiellement pour les deux raisons suivantes :
3. La modélisation des propriétés dynamiques des systèmes peut devenir rapidement très complexe et, par le fait même, augmenter de manière très significative le nombre de variables à supporter.
 4. D'une part, l'intérêt didactique de ces aspects didactiques est important du point de vue technologique mais, d'autre part, les phénomènes mis en cause sont d'une durée très courte (généralement moins d'une seconde). Ceci implique une très grande vitesse de traitement informatique pour respecter le temps réel, ce qui peut dépasser le type d'ordinateurs disponibles. Une alternative que nous envisagerons au besoin serait de ralentir les phénomènes en question. Cependant cette option nous conduirait à «fausser» la réalité expérimentale, ce qui comporte aussi des inconvénients didactiques évidents.
- 5- Les états semi-stables des vérins pneumatiques et des charges qui leur sont rattachées, c'est-à-dire l'espace d'évolution position / vitesse, en tenant compte de la com-

compressibilité de l'air (selon la loi des gaz : $P_1 V_1 = P_2 V_2$) et des forces différentes qui résultent des coefficients de frottement statique et dynamique. Ces états sont caractérisés par un mouvement saccadé, soit l'alternance arrêt-mouvement. L'intérêt de ce phénomène se situe surtout au niveau qualitatif. Il convient donc de l'illustrer lorsqu'il est perceptible à l'écran, soit lorsque sa durée est supérieure à environ 0,3 secondes.

6- Le bilan énergétique des systèmes hydrauliques, c'est-à-dire l'évolution température / temps du système, en fonction, d'une part, des pertes énergétiques qui se transforment en chaleur à cause des fuites, des pertes de rendement et des effets des limiteurs de débit et de pression, et, d'autre part, en fonction de la capacité de dissipation de chaleur du système et de la température de son environnement.

10. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DU SIMULATEUR

Nous décrivons dans cette section les principales caractéristiques d'ordre général auxquelles devra répondre le simulateur. À plusieurs égards, elles comportent un caractère novateur et constituent, pour ainsi dire, la spécificité de l'infrastructure «visible» de l'environnement d'apprentissage.

10.1. CONDUITS INCORPORÉS DANS LES COMPOSANTS

Généralement, dans les logiciels de nature semblable, les conduits qui relient les divers composants doivent être incorporés explicitement dans le circuit. Dans notre cas, ils seront inclus (implicites) dans chacun des ports des composants, comme s'ils étaient, pour ainsi dire, enroulés dans le composant, et qu'il suffirait de tirer sur eux, avec la souris, pour les sortir. Chaque port «déroulera» le type de conduit (de débit, de pilotage ou électrique) qui lui correspond. Ainsi, pour raccorder deux composants, l'utilisateur cliquera avec la souris sur le port d'un composant, puis «tirera» le conduit et le déposera sur le port de l'autre composant. Afin de faciliter l'opération, la région immédiate des ports effectuera l'alignement

automatique du curseur de la souris. Enfin, si l'utilisateur déplace un composant déjà raccordé, les conduits s'ajusteront à la nouvelle position. L'objectif poursuivi est de rendre l'opération de raccordement, habituellement longue et fastidieuse, beaucoup plus rapide et agréable à réaliser. Bien entendu, cette manière de procéder s'éloigne de la réalité. Cependant, étant donné que l'opération de raccordement ne comporte aucun apprentissage significatif, notre choix se justifie par les importantes réductions de temps qu'elle représente.

10.2. RACCORDEMENTS AUTOMATIQUES DES APPAREILS DE MESURE

Dans le même objectif de faciliter et d'accélérer l'opération de raccordement, lors de l'insertion des appareils de mesure dans un circuit préalablement raccordé avec des conduits, ces composants se raccorderont automatiquement au conduit sur lequel ils seront placés ; en somme, il suffira de les déposer sur le conduit voulu. Cette fonction évitera de refaire les conduits et accélérera l'opération, particulièrement lors des ajouts et des modifications du circuit.

10.3. CODE DE COULEURS

En hydraulique, il existe un code de couleurs normalisé pour les illustrations en coupe des composants et des conduits ; les couleurs utilisées sont fonction de la pression du fluide :

- Bleu, $P = 1$ bar (pression atmosphérique)
- Rouge, lorsque la pression $P > 1$ bar
- Vert, lorsque la pression $P < 1$ bar (vide total ou partiel)
- Jaune-orange, lorsque l'écoulement de l'huile est restreint par un régulateur de débit.

En pneumatique, il n'existe pas de code équivalent ; toutefois, en général, on utilise uniquement le bleu turquoise.

Pour l'essentiel, notre simulateur respectera ce code, avec les nuances suivantes, pourvu que les capacités de la carte graphique de l'ordinateur le permettent :

1. En hydraulique, le rouge augmentera d'intensité selon la pression, allant d'un rouge pâle ($P < 50$ bar) à un rouge foncé ($P > 300$ bar). Le blanc représentera l'absence d'huile sous vide (le code ne prévoit rien dans ce cas).
2. En pneumatique, la couleur passera graduellement du blanc, pour le vide ($P = 0$), au bleu pâle ($P = 1$ bar) et au bleu foncé ($P > 8$ bar) .

Compte tenu de ce qui précède, le choix de la couleur de fond de l'écran doit permettre de bien distinguer toutes ces couleurs, tout en faisant ressortir la couleur noire des symboles des composants. A priori, un fond de couleur vert-gris nous semble convenable. Éventuellement, l'utilisateur pourrait choisir sa couleur préférée.

10.4. COMPOSANTS «ALTÉRÉS»

Afin de simuler des dysfonctions et des pannes, les valeurs des divers paramètres des composants pourront être « altérés » par un professeur ayant un accès protégé (avec un mot de passe, par exemple). Ces valeurs ne seront pas visibles ni accessibles à l'étudiant et prévaudront sur celles qu'il donnera. En d'autres mots, les différents paramètres de la boîte de dialogue du composant afficheront les valeurs données par l'étudiant ; cependant, la simulation tiendra compte des valeurs préalablement données par le professeur. Bien entendu, si l'étudiant remplace le composant altéré par un autre qu'il aura choisi dans le menu, celui-ci fonctionnera normalement, ce qui équivaut à remplacer un composant défectueux par un composant neuf.

L'objectif visé est de rendre compte des principaux types de pannes et problèmes rencontrés dans les situations réelles. L'étudiant, placé face à des situations présentant un mauvais fonctionnement, devra diagnostiquer le problème, faire des essais, trouver les causes et procéder au remplacement et au réglage des composants défectueux. Il pourra aussi être mis en situation de réaliser des expérimentations pour comparer le fonctionnement des composants en regard des courbes caractéristiques de leur modèle explicatif.

10.5. SIMULATIONS EN TEMPS RÉEL

Nous entendons par temps réel, la prise en compte de la variable temps, selon un degré de précision suffisant pour que les représentations à l'écran des espaces d'évolution position / vitesse permettent des observations significatives du point de vue qualitatif. De manière générale, on peut avancer que tout phénomène dont la durée est inférieure à 0,3 secondes n'a pas à être considéré pour fins de représentation graphique. Ainsi, par exemple, les mouvements rapides, tels les accélérations ou les temps de réponse des appareils, échappent à l'observation directe. Ils ne présentent alors aucun intérêt didactique. Ces mouvements peuvent devenir significatifs et intéressants à observer au ralenti. Contrairement, certains phénomènes, tel le réchauffement du système, nécessitent beaucoup de temps pour se manifester de manière significative. Il convient donc de pouvoir ralentir ou accélérer les simulations. A priori, des facteurs de multiplication du temps réel compris entre 0,1 et 10 nous paraissent suffisants ; l'expérience montrera si l'on peut utiliser d'autres valeurs, compte tenu de la vitesse de traitement de l'ordinateur utilisé.

10.6. GRAPHEUR ET CHRONOGRAMME

Le grapheur permettra l'élaboration automatique de courbes à partir des données générées par la simulation. Ces données seront celles enregistrées par les appareils de mesure virtuels présents dans le système. L'étudiant pourra ainsi mettre en relation cartésienne des grandeurs telles pression-débit pour obtenir les données ou la courbe de rendement et de puissance, température-temps pour la courbe d'équilibre thermique et d'énergie dissipée, etc. Lors de la simulation, la courbe se construira en temps réel, de manière à permettre la visualisation simultanée du comportement virtuel du système et de sa représentation graphique. Le grapheur apparaîtra à l'écran sur une fenêtre mobile de grandeur réglable. Afin de comparer les courbes, on pourra répéter jusqu'à quatre fois une même simulation avec des paramètres différents ; chacune des courbes sera de couleur différente et pourra être effacée de manière sélective.

Pour commander les composants à effet proportionnel (pompe à cylindrée variable, limiteur de pression, réducteur de pression et distributeur) l'utilisateur disposera d'un chronogramme, au moyen duquel il pourra définir une courbe composée d'une série de segments de droite, passant par des points choisis avec la souris dans un quadrillé d'environ 20 colonnes sur 10 rangées. La courbe ainsi construite représentera des variations d'intensité de courant électrique (axe Y) en fonction du temps (axe X). Toutefois, à ce stade, les incertitudes technologiques que nous aurons à confronter ne nous permettent pas encore d'assurer que les aspects d'hydraulique proportionnelle et, par le fait même du chronogramme, seront intégrés lors de la réalisation du prototype.

11. EXEMPLE D'UN SYSTÈME REPRÉSENTATIF DES PRINCIPALES FONCTIONS À SIMULER

Le système hydraulique de la figure 4, même s'il est relativement simple et qu'il comporte peu de composants, condense l'essentiel des difficultés de simulation que l'on peut anticiper. Bien entendu, les symboles utilisés sont normalisés. Ils constituent le langage graphique d'utilisation courante dans la discipline. Pour aider le lecteur peu familier avec ces symboles, nous avons ajouté le nom des composants.

L'objectif de la description qui suit, quoiqu'elle ne soit pas exhaustive, est d'expliciter le fonctionnement du système et les aspects clés dont le simulateur doit rendre compte.

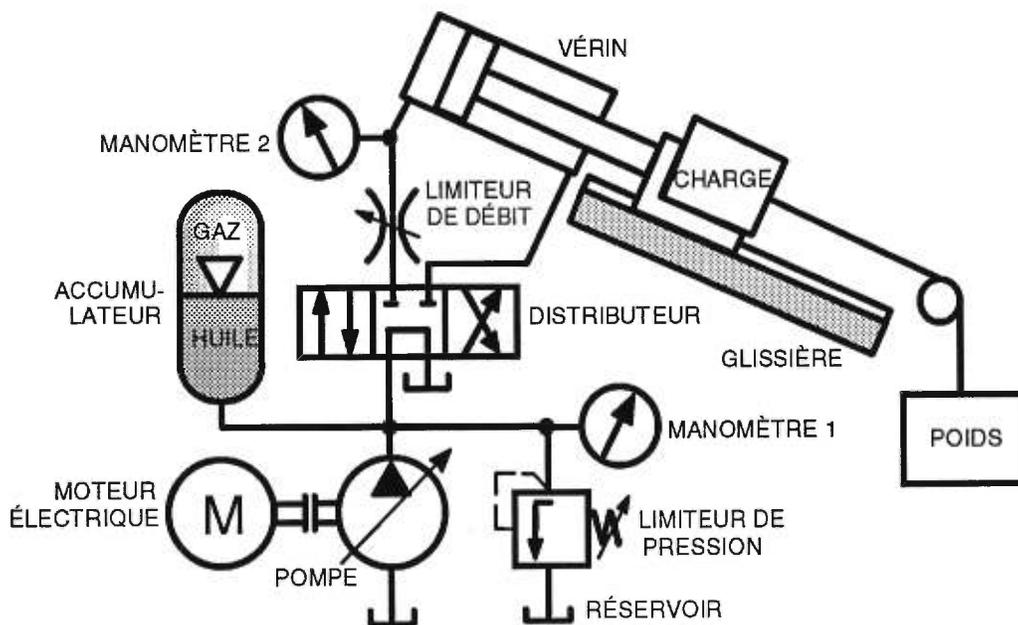


Figure 4. Exemple d'un système représentatif des principales fonctions à simuler.

11.1. DESCRIPTION DU FONCTIONNEMENT DU SYSTÈME

Dans la situation illustrée, le moteur électrique entraîne la pompe, laquelle aspire le liquide du réservoir (le symbole de ce composant peut être répété afin de minimiser les conduits) et le fait circuler dans le circuit. Dès la sortie de la pompe, le liquide peut emprunter trois voies : à gauche, vers l'accumulateur ; à droite, vers le limiteur de pression et le réservoir ; ou en avant, vers le distributeur et le réservoir. Le liquide prendra la voie qui offre le moins de résistance à son écoulement. La voie de l'accumulateur présente une résistance puisque le gaz qu'il contient est sous pression (précharge). La voie du limiteur de pression présente aussi une résistance car cet appareil demeure fermé tant que la pression est inférieure à celle du réglage. La voie en avant est ouverte car le passage vers le réservoir est libre ; elle recevra donc la totalité du débit. Dans ces conditions, seule la pompe doit s'animer pour illustrer son fonctionnement et le manomètre 1 indiquera une pression pratiquement nulle car il n'y a pas de résistance à l'écoulement.

Lorsque le distributeur sera actionné, en cliquant sur la case des flèches en parallèle, celle-ci se placera à la position centrale, ouvrant la voie vers le limiteur de débit et le vérin. Cette voie sera viable pour autant que le liquide trouve une issue finale vers le réservoir ; ici, le liquide entrera dans le vérin et le fera avancer ; de l'autre côté du piston, le liquide sera refoulé hors du vérin, vers le réservoir. En principe, cette voie est donc viable ; encore faut-il que la pression nécessaire pour la franchir soit inférieure à celle des autres voies possibles. Le calcul de cette pression tiendra notamment compte de la force nette qui agit sur la tige, de la force de frottement du vérin lui-même, de la composante verticale des charges, des coefficients de frottement statique et dynamique de la glissière et de la surface du piston. Si la force qui en résulte est résistante, la pression dans le système sera celle nécessaire au vérin pour exercer une force équivalente. Si elle est menante, il y aura descente précipitée de la charge et formation du vide dans le vérin. Ce vide sera résorbé graduelle-

ment, à mesure que le débit en provenance de la pompe le comblera. Dans les deux cas, il y aura accélération des charges. Ce phénomène, quoique généralement de courte durée, est important à considérer car pendant qu'il se manifeste, le débit de la pompe n'est pas admis en totalité dans le vérin ; l'excédent doit alors emprunter la voie vers l'accumulateur. De plus, ces situations seront influencées par le réglage du limiteur de débit : s'il ne permet pas le passage de tout le débit issu de la pompe, l'excédent servira à remplir l'accumulateur ; la pression au manomètre 1 sera alors celle du gaz de précharge. À mesure que l'accumulateur se remplira, la pression augmentera jusqu'à celle de réglage du limiteur de pression. Par la suite, le limiteur de pression s'ouvrira et laissera passer le débit vers le réservoir. Étant donné que la pression en amont du limiteur de débit variera, le débit qu'il laissera passer variera aussi, affectant ainsi la vitesse du vérin et celle de remplissage de l'accumulateur.

Lorsqu'on cliquera sur la case des flèches en croix du distributeur, sensiblement les mêmes situations se reproduiront, avec les nuances suivantes. La force résultante sera maintenant plus importante car les forces composantes seront toutes résistantes. La vitesse du vérin sera plus grande, étant donné que la surface de la couronne du piston est inférieure à celle du piston. De plus, le limiteur de débit agira maintenant à la sortie, de sorte que le vérin sera soumis à une forte poussée du côté de la tige, poussée générée par la pression de réglage du limiteur de pression. Cette poussée sera réduite par les forces qui s'opposent au mouvement ; la force résultante sera équilibrée par une poussée équivalente dans le sens opposé, laquelle générera une pression du côté du piston.

Cette description est, en tout point, conforme à l'algorithme général que nous présentons au chapitre VII, lequel est dérivé du cadre théorique exposé dans le même chapitre ; ce cadre théorique constitue la référence fondamentale à laquelle toutes les simulations devront satisfaire.

11.2. DESCRIPTION DES ANIMATIONS Â RÉALISER

La description précédente se traduira, au niveau des composants, par un comportement observable à l'écran, selon les animations suivantes :

- POMPE :

- 1- Animation d'une série de triangles successifs pour illustrer son fonctionnement et le sens de rotation. Les triangles naîtront et grandiront à mesure qu'ils feront une rotation de 180° dans le sens positif, puis disparaîtront, à une vitesse d'environ $\frac{1}{2}$ tour / sec.
- 2- S'il s'agit d'une pompe à cylindrée variable, le réglage de celle-ci se fera avec la souris, en variant l'angle de la flèche. La cylindrée augmentera proportionnellement avec l'inclinaison de la flèche. La cylindrée maximale correspondra à la position inclinée à 45° et la cylindrée nulle à la position verticale. Le réglage pourra se faire de manière dynamique, en cours de simulation. La valeur de la cylindrée sera affichée pendant le réglage, à côté de la flèche, et s'effacera un instant après l'opération terminée.
- 3- La réversibilité de la pompe en moteur sera indiquée par l'inversion des triangles (ils pointeront alors vers l'intérieur) et de leur sens de rotation. Cet aspect est particulièrement important car, du point de vue fonctionnel, rien ne permet de distinguer un moteur d'une pompe. En inversant le sens des triangles et le sens de rotation, l'étudiant pourra observer cette réversibilité.

- VÉRIN :

- 1- Le mouvement de l'ensemble piston-tige se fera en fonction du débit que reçoit le vérin.

- 2- En fonctionnement normal, les deux chambres du vérin seront considérées toujours remplies de liquide ; lorsqu'il se produira le vide, le vérin se déplacera sans qu'il y ait apport de liquide et la chambre impliquée restera vide.
 - 3- La couleur du remplissage des deux chambres tiendra compte de la pression qui y règne, selon le code de couleurs déjà évoqué.
 - 4- Le vérin pourra s'incliner à un angle quelconque. Les dimensions du vérin (diamètre du piston, diamètre de la tige et course) seront réglables, en mode dynamique avec la souris (par sauts de grille). Ces particularités seront réalisées dans le prototype dans la mesure où les contraintes informatiques importantes qu'elles représentent seront raisonnablement surmontables.
 - 5- Dans la mesure du possible, il serait intéressant que la représentation du vérin ait une apparence 3D.
- MÉCANISMES (GLISSIÈRE, CHARGE ET POIDS) :
 - 1- Ils se déplaceront en suivant le mouvement du vérin.
 - 2- La glissière adoptera la même inclinaison et la même course que le vérin auquel elle sera rattachée.
 - 3- Les masses suspendues par un câble resteront toujours en position verticale ; la portion du câble qui les rattache à la glissière s'ajustera en conséquence.
 - 4- Les charges et les poids seront représentés par des rectangles dont la grosseur sera proportionnelle à la valeur de leur masse.

- LIMITEUR DE PRESSION :

Position ouverte ou fermée : déplacement de la flèche vers la droite et passage à la couleur rouge.

- DISTRIBUTEUR :

Un clic sur une des cases (droite ou gauche) permutera cette case avec celle du centre.

- ACCUMULATEUR :

Illustration du remplissage (en couleur rouge) en fonction du temps ; possibilité de modifier ce niveau en mode dynamique, avec la souris.

- MOTEUR ÉLECTRIQUE :

Aucune animation.

- MANOMÈTRE :

Aucune animation. Seule la valeur de la pression enregistrée devra s'inscrire à côté du manomètre

- LIMITEUR DE DÉBIT :

Aucune animation.

- ÉLABORATION DE GRAPHES :

Construction de courbes, en temps réel, mettant en relation cartésienne deux variables, dont les valeurs seront saisies par des appareils de mesure présents dans le système. Il s'agit notamment des variables : temps, position, force, moment, pression, volume, débit, puissance et température.

Il est clair que les spécifications évoquées ici constituent nos intentions de départ. Elles expriment notre vision des choses à un moment donné, mais cette vision peut évoluer selon les expériences et apports divers qui pourront se manifester tout au long de la réalisation de l'environnement d'apprentissage. De plus, ces spécifications devront être confrontées à la réalité de leur faisabilité autant technologique que pratique et économique. Il est donc à prévoir qu'en cours d'élaboration du prototype, de nouvelles idées viendront bonifier certains aspects, ou que l'on soit amené à en reconsidérer certains autres à la suite de difficultés particulières. Comme c'est normal en situation de recherche et de développement technologique, les «à priori» ne sauraient être trop rigides, particulièrement pour ce qui est de la forme finale du produit à développer. Par contre, il est clair aussi que les grands objectifs de recherche poursuivis et les paramètres essentiels devant entourer la réalisation de l'environnement d'apprentissage seront considérés comme incontournables, à moins que nous rencontrions des difficultés vraiment majeures.

CHAPITRE VI

RÉALISATION DU PROTOTYPE

DE L'ENVIRONNEMENT D'APPRENTISSAGE INFORMATISÉ

1. INTRODUCTION

Nous exposons ici le compte rendu des circonstances et des conditions qui ont prévalu lors de la réalisation du prototype de l'environnement d'apprentissage. Nous ferons état des diverses étapes et des principaux ajustements qui se sont avérés nécessaires tout au long du processus de sa réalisation.

Le prototype s'est réalisé en deux grandes phases. La première a consisté à produire un prototype assez limitée quant à son envergure mais suffisamment complet et fonctionnel pour nous permettre de vérifier la faisabilité informatique des principaux aspects du projet, ainsi que la pertinence des orientations didactiques essentielles que nous préconisions. Les implications budgétaires étaient nécessairement restreintes.

La deuxième phase devait permettre de réaliser la totalité du projet et d'y inclure les modifications et ajustements qui se seraient avérés pertinents suite aux expériences faites avec le premier prototype.

Au point de départ, nous ne disposions pas d'indices qui nous permettaient d'évaluer, de manière quelque peu fiable, les coûts de développement de l'ensemble du projet. Pour ce qui est des travaux de recherche préalables à la réalisation du prototype proprement dit, tels la caractérisation des fausses représentations conceptuelles des étudiants, nous les avons réalisés dans le cadre de subventions de recherche du PRDF¹ et du PAREA².

¹ PRDF : Programme de recherche-développement des formateurs de la DGERU, Ministère de l'enseignement supérieur et de la science du Québec.

² PAREA : Programme d'aide à la recherche sur l'enseignement et l'apprentissage, DGEC, Ministère de l'éducation du Québec.

2. RÉALISATION DU PREMIER PROTOTYPE

Une partie importante du premier prototype fut aussi réalisée à l'aide de ces subventions, dans le cadre d'un projet de recherche conjoint impliquant l'École de technologie supérieure et le Collège de Valleyfield. Cependant, à la fin du projet, un investissement financier personnel fut nécessaire pour le rendre à un stade suffisamment avancé et fonctionnel.

Ce premier prototype a fait l'objet notamment de trois communications (Cervera et al. 1991-B-; Cervera et al. 1992 ; Cervera et Nonnon, 1993).

La réalisation informatique fut l'œuvre de Pascal Bigras. Les algorithmes étaient développés selon une approche basée sur le fonctionnement logique des systèmes. Cette approche s'est avérée rapidement limitée pour supporter l'ensemble des fonctionnalités du premier prototype, notamment lorsque dans un circuit il y avait présence d'embranchements (noeuds) dans les conduits ; le comportement du système était alors inadéquat. Il était donc clair que nous devrions adopter une autre approche de modélisation pour le deuxième prototype.

C'est en raison des limitations de l'approche basée sur le fonctionnement logique des systèmes que nous avons pris conscience de l'absence d'un ensemble cohérent de lois qui permettrait d'articuler une analyse du comportement des systèmes. C'est pour répondre à cette volonté didactique d'explicitier ce comportement que nous avons entrepris d'élaborer le cadre théorique qui fera l'objet du chapitre suivant. Au plan didactique, ce cadre constitue, pour l'hydraulique et la pneumatique, le pendant de la théorie des circuits en électricité ; il permet d'explicitier les règles qui sous-tendent le comportement des fluides et de rendre intelligible la manière dont ils se distribuent dans les systèmes.

3. RÉALISATION DU DEUXIÈME PROTOTYPE

À l'origine, le deuxième prototype devait être développé en collaboration avec un organisme subventionnaire du ministère de l'Éducation. Cet organisme s'est finalement désisté, notamment en raison de l'envergure du travail impliqué et des limites budgétaires.

Nous avons alors conclu une entente privée de partenariat avec Pascal Bigras et Tony Wong portant sur les droits de commercialisation du prototype à créer et de toute version qui serait développée ultérieurement, autant pour les applications reliées à l'enseignement qu'à l'industrie.

Dans le cadre de cette entente de partenariat, Pascal Bigras a assumé notamment la responsabilité de la conception et de la réalisation informatique des algorithmes de simulation selon une approche de modélisation propre à optimiser le fonctionnement des systèmes complexes et à rendre compte notamment des phénomènes dynamiques. Précisons que cette approche de modélisation est indépendante de l'approche de modélisation didactique du cadre théorique qui sera présenté au chapitre suivant. Comme nous le disions plus haut, ce cadre a été développé pour des raisons essentiellement didactiques reliées à la volonté d'explicitier le fonctionnement des systèmes. Cette façon de faire nous a permis de tester la cohérence des deux approches lors de la mise à l'essai fonctionnelle.

Pour ce qui est de Tony Wong, il a assumé notamment la responsabilité de la conception reliée à l'algorithmie de l'interface usager et de sa réalisation informatique.

Quant à l'auteur de cette thèse, il a assumé notamment la responsabilité des aspects reliés à la conception didactique et disciplinaire.

Le logiciel ainsi produit est l'œuvre des trois co-auteurs et, à ce titre, il ne fait pas partie intégrante de cette thèse. Le logiciel est commercialisé sous le nom de Hydro+Pneu[©] ³. Une première version préliminaire a été présentée à l'occasion du colloque de l'ARC en mai 1997 (Cervera, Bigras et Wong, 1997).

4. ADOPTION DE HYDRO+PNEU[©] POUR LA SUITE DES TRAVAUX

Le logiciel Hydro+Pneu[©] comporte des caractéristiques fonctionnelles qui lui sont propres et qui dépassent celles prévues dans notre cahier des charges originel. La qualité des algorithmes lui confèrent des aptitudes pour les applications industrielles, notamment en conception de systèmes, que nous ne poursuivons pas dans le cadre de nos objectifs de recherche. En d'autres mots, au plan disciplinaire, Hydro+Pneu[©] présente l'avantage de dépasser les caractéristiques requises dans le cadre de cette thèse ; au plan didactique, il satisfait pleinement aux objectifs de recherche énoncés au chapitre II :

«Il s'agit d'un logiciel de simulation avancée et d'apprentissage de systèmes hydrauliques et pneumatiques. Sa vocation est d'illustrer et de rendre intelligible, au niveau qualitatif et quantitatif, le comportement des systèmes, et de permettre l'observation des phénomènes qui s'y produisent, dans un contexte proche de la réalité industrielle, c'est-à-dire lorsqu'ils actionnent des mécanismes et des charges, et en tenant compte des frottements, des inerties, des rendements, des transformations énergétiques, etc.

Bien plus qu'un logiciel d'analyse, Hydro+Pneu constitue à la fois un outil didactique et un laboratoire virtuel d'expérimentation pour les débutants et pour les experts».

(Réf. : feuillet de présentation du logiciel Hydro+Pneu, 1997).

³ **Hydro+Pneu** ©, Bigras, P., Cervera, D. et Wong, T. (1997). Logiciel de simulation avancée de systèmes hydrauliques et pneumatiques.

Ainsi, pour la suite de nos travaux, nous avons adopté le logiciel Hydro+Pneu[©] notamment pour ce qui est de l'élaboration des situations d'apprentissage et pour les mises à l'essai dont la démarche et les résultats seront présentés au chapitre VIII. Ce logiciel a permis notamment de résoudre le problème rencontré avec le premier prototype concernant les noeuds dans les conduits. Par contre, ses exigences de traitement informatique sont plus importantes, ce qui nous a confrontés à un choix concernant la vitesse de traitement de l'ordinateur ; avec les appareils de type PC 486 que nous considérons comme le modèle de base au départ, le temps de simulation «s'étirait» de façon significative avec des systèmes relativement complexes. Nous étions donc contraints à viser le modèle PC 586 (Pentium) qui, à ce moment là (1995-96), était encore assez dispendieux et peu répandu. Nous avons estimé que ces inconvénients se résorberaient d'eux mêmes, par le simple fait que, avec le temps, le prix de ces appareils serait de plus en plus accessible.

Au chapitre des avantages, notons particulièrement que dans le cahier des charges de départ (chapitre V), on mentionne l'intérêt didactique que présentent les phénomènes transitoires causés par les inerties durant les accélérations ; on mentionne aussi les difficultés que nous anticipions à ce sujet en ce qui concerne la capacité de traitement informatique. L'utilisation d'ordinateurs de type Pentium permet de satisfaire cet aspect et de réaliser en permanence les simulations en mode dynamique, ce qui simplifie grandement le contexte expérimental et favorisé l'étude des phénomènes dynamiques.

À l'annexe III, nous présentons plusieurs exemples tirés de la banque de situations expérimentales d'apprentissage que nous avons élaborée à l'aide de Hydro+Pneu[©], incluant une description succincte des principaux phénomènes dont le logiciel rend compte et des observations qu'il permet d'effectuer, ainsi que des suggestions pour modifier la configuration de départ, afin d'explorer plus à fond les expérimentations.

CHAPITRE VII

L'ÉLABORATION D'UN CADRE THÉORIQUE

EN ÉNERGIE DES FLUIDES

L'ÉLABORATION D'UN CADRE THÉORIQUE EN ÉNERGIE DES FLUIDES

1. INTRODUCTION

Tout au long du développement du modèle d'action visant à définir de manière détaillée les fonctionnalités pédagogiques et technologiques de l'environnement d'apprentissage, et plus particulièrement lorsque nous voulions expliciter les règles qui sous-tendent le fonctionnement des systèmes d'énergie des fluides, nous avons constaté l'existence d'un vide épistémologique important dans la discipline, soit l'absence d'un cadre théorique permettant d'expliquer, de manière complète et cohérente, l'ensemble des lois et règles du comportement de ces systèmes. Ainsi, dans le but de répondre à cette nécessité didactique, nous avons entrepris d'élaborer ce cadre théorique «manquant», c'est-à-dire d'expliquer ces règles, de revoir certaines conceptions courantes et de proposer une nouvelle approche pour faciliter l'analyse des systèmes. Cet aspect de la thèse doit être vu comme notre principale contribution théorique à l'avancement des connaissances.

Premièrement, nous porterons un regard critique sur l'état de l'épistémologie de la discipline, afin de circonscrire les éléments que devrait comporter ce cadre théorique «manquant». Deuxièmement, nous entreprendrons l'élaboration de ce cadre, ce qui nous conduira à dégager les règles de l'écoulement des fluides à partir d'une analyse qualitative du comportement du fluide dans les vases communicants, puis nous remettrons en question la conception courante selon laquelle chaque composant n'exerce qu'un seul rôle spécifique dans un système, et exposerons l'importance de tenir compte du principe de la réversibilité des composants et des systèmes sous l'effet des forces menantes. Troisièmement, nous proposerons une approche pour analyser les systèmes basée sur les règles en question et sur le fait que ces systèmes constituent, en fait, des vases communicants ; nous expose-

rons aussi, pour fins d'illustration, l'étude d'un système hydraulique simple. Finalement, nous dégagerons quelques conclusions de ces travaux.

2. PERSPECTIVE ÉPISTÉMOLOGIQUE

Le comportement des systèmes hydrauliques et pneumatiques industriels est complexe et sa compréhension ne relève pas de la simple évidence. Malheureusement, ni les manuels d'apprentissage, ni les ouvrages plus spécialisés, n'exposent l'ensemble des règles qui sous-tendent ce comportement, de sorte que les étudiants éprouvent des difficultés majeures à comprendre, à analyser et à anticiper le fonctionnement de tels systèmes. Quant aux enseignants, cette absence de règles explicites laisse la place à plusieurs interprétations et explications différentes de ce fonctionnement. Nous constatons que, du point de vue épistémologique, la théorie des circuits est pratiquement inexistante, contrairement à la situation qui prévaut en électricité, par exemple. Par ailleurs, nous constatons aussi, comme nous le disions dans la problématique (chapitre I), qu'un simple survol des manuels permet de remarquer que la plupart d'entre eux font état des principales lois qui concernent ces domaines, mais qu'elles sont présentées comme allant de soi, de manière détachée et sans continuité épistémologique avec le reste des contenus, de sorte que l'étudiant doit en deviner la portée, le champ de validité et le contexte d'application. De plus, dans les manuels, l'étude des circuits se fait à partir de cas élémentaires, présentant chacun une fonction technologique qui est matérialisée par un composant particulier ; les situations plus complexes sont abordées par le simple cumul de fonctions élémentaires. Or, cette approche s'avère rapidement incapable de rendre compte des interactions qui s'exercent entre les divers composants car elle ne favorise pas une vision d'ensemble. Nous en concluons que l'étude des systèmes se fait sans aucun référentiel général permettant d'articuler une analyse cohérente et structurée, et attribuons cette situation aux limitations inhérentes à l'approche d'enseignement basée sur l'étude des composants, par opposition à l'approche

systemique, dont nous avons présenté les grandes lignes et principales caractéristiques au chapitre IV portant sur les considérations théoriques.

Par delà ces considérations, notre environnement d'apprentissage est basé sur l'expérimentation assistée par ordinateur, selon une perspective systemique de modélisation. Cette approche implique que les règles qui sous-tendent le fonctionnement des systèmes à l'étude soient bien connues et que l'on puisse les expliciter, ce qui actuellement n'est pas le cas dans le domaine qui nous concerne. Le propos de notre cadre théorique est de pallier dans la mesure du possible à cette situation.

Toutefois, avant de présenter ce cadre, nous ferons état d'un dernier aspect concernant l'épistémologie. Il est singulier de constater que l'on fait souvent appel aux analogies hydrauliques pour expliquer les concepts plus abstraits de l'électricité. Ainsi, on associe fréquemment courant et débit, tension et pression. Inversement, les personnes qui sont familières avec ces concepts d'électricité ont tendance à aborder les concepts d'hydraulique à partir de ces mêmes analogies. Cette situation nous paraît particulièrement délicate, voire conflictuelle, pour deux raisons ; la première à trait à la présomption voulant que les concepts de débit et pression soient «naturellement» bien connus ; or, nos travaux (Cervera et al., en rédaction) montrent que tel n'est pas le cas et que même après avoir reçu un enseignement formel, bon nombre d'étudiants conservent des fausses représentations au sujet de ces deux concepts en particulier. Le deuxième aspect, nous paraît plus fondamental, en ce sens qu'il existe des différences essentielles entre les caractéristiques des technologies électrique et hydraulique. En fait, les concepts associés, pression-tension et débit-courant, sont, en réalité, probablement plus dissemblables qu'analogues, particulièrement lorsqu'on les réfère à l'hydrostatique. Le tableau V illustre quelques unes de ces différences, en relation avec ces concepts.

TABLEAU V. COMPARAISON ENTRE LES CARACTÉRISTIQUES DES TECHNOLOGIES ÉLECTRIQUE ET HYDRAULIQUE

TECHNOLOGIE ÉLECTRIQUE	TECHNOLOGIE HYDRAULIQUE
1 La source d'énergie produit une tension constante ; le courant varie avec la résistance.	La source d'énergie produit un débit constant ; la pression varie avec la résistance.
2 Le courant et la puissance tendent vers l'infini.	Le débit et la puissance tendent à être constants.
3 La force d'un solénoïde et le couple d'un moteur sont fonction du courant ; leur vitesse est fonction de la tension.	La force d'un vérin et le couple d'un moteur sont fonction de la pression ; leur vitesse est fonction du débit.
4 Le mouvement des moteurs et des solénoïdes n'est pas en lien étroit avec le courant : si le courant est nul, ils sont libres de se mouvoir ; inversement, le courant peut circuler même s'ils sont arrêtés,	Le mouvement des moteurs et des vérins se fait en lien étroit avec le débit : si le débit est nul, leur mouvement est bloqué ; de même, le débit ne peut pas circuler lorsqu'ils sont arrêtés.
5 On peut interrompre le courant instantanément. Les inerties n'ont généralement pas d'effet sur le comportement du système.	On ne peut pas interrompre le débit instantanément. Les inerties (y compris celle du fluide) peuvent affecter fortement le comportement du système.

On remarquera que ces différences sont assez fondamentales, de sorte que le recours aux analogies évoquées peut avoir comme conséquence d'entretenir, voire de générer de fausses représentations conceptuelles.

3. ÉLABORATION D'UN CADRE THÉORIQUE EN ÉNERGIE DES FLUIDES

Notre cadre théorique s'articule autour d'un thème central, selon lequel tout système hydraulique ou pneumatique constitue, en fait, un système de vases communicants, et des cinq éléments suivants :

- 1- Les règles de l'écoulement des fluides (liquides et gaz) dans les vases communicants,
- 2- La structure fonctionnelle des systèmes d'énergie des fluides,
- 3- Le principe de réversibilité des composants et des systèmes sous l'effet des forces menantes,
- 4- L'analyse du comportement des systèmes selon l'approche des vases communicants et la structure de la topologie des circuits en branches, boucles et collecteurs,
- 5- L'algorithme général permettant d'articuler et de rendre opérationnels tous ces éléments.

3.1. LES RÈGLES DE L'ÉCOULEMENT DES FLUIDES

La loi des vases communicants est rarement présentée dans les manuels d'énergie des fluides, probablement à cause que l'état d'équilibre final qu'elle exprime est suffisamment accessible et porté par l'évidence. Toutefois, cette loi n'explique rien pour ce qui est de la manière dont le liquide se comporte et se distribue avant de parvenir à cet état final d'équilibre. Nous entendons démontrer ici que la connaissance des phénomènes qui y conduisent est à la base de la compréhension du comportement des systèmes hydrauliques ; aussi, c'est à partir de l'analyse qualitative de ces phénomènes que nous allons dégager les règles qui sous-tendent ce comportement.

Rappelons que l'objectif premier de cet exposé est de procurer, notamment aux étudiants de l'ordre collégial, un cadre théorique qui leur permettra d'engager une analyse qualitative du comportement des systèmes. Aussi, par souci de simplification, nous présumons que le liquide est visqueux, de sorte que les phénomènes décrits se produisent lentement et sans les oscillations qui résulteraient de l'inertie de sa masse ; nous négligeons aussi les aspects énergétiques inhérents à l'écoulement des fluides visqueux et aux régimes d'écoulement. De plus, les conduits sont considérés homogènes et d'égale longueur.

La situation illustrée à la figure 5 représente un système de vases communicants dans lequel le niveau de liquide n'est pas égal dans toutes les branches. Cette situation constitue un état transitoire de déséquilibre, un état instable possible seulement pen-

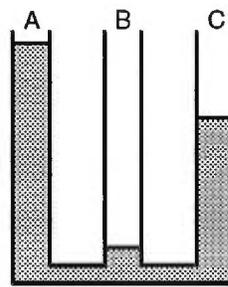


Figure 5. Vases communicants : situation instable

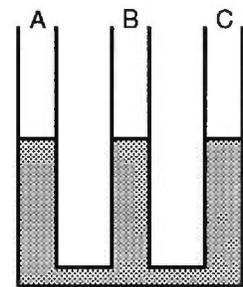


Figure 6. Vases communicants : situation stable

dant qu'il y a écoulement, c'est-à-dire pendant que le liquide se déplace vers une position stable. La loi des vases communicants précise que le liquide se stabilisera lorsque le niveau sera identique dans toutes les branches : le niveau des branches A et C cherchera à descendre, faisant monter celui de la branche B, tel qu'illustré à la figure 6.

Cette loi est simple et accessible mais, pourquoi le liquide cherche-t-il cet état d'équilibre ? Comment le passage d'un état à l'autre se fait-il ? Y a-t-il un ordre d'écoulement pour chaque branche ? Cet écoulement se fait-il simultanément dans toutes les branches ?

En premier lieu, le liquide, comme tout autre corps, obéit à la loi de la gravitation. Il a donc tendance à descendre. Cependant, ici, la descente du liquide d'une branche implique

la montée du niveau de d'autres branches. Dès lors, la simple loi de la gravitation semble insuffisante, voire conflictuelle, pour expliquer la situation, en ce sens que, pour satisfaire la tendance à descendre d'une branche haute, il faut qu'une autre branche plus basse se comporte à l'encontre de cette tendance. Pour clarifier cette apparente ambiguïté, il convient de préciser que la gravité implique que tout corps tend à se déplacer dans le sens du moindre potentiel global. En d'autres mots, un corps «désobéira» à la gravité, c'est-à-dire montera, si, ce faisant, il permet à un autre corps de descendre et que, dans cet échange, la somme d'énergie potentielle des deux corps diminue. C'est ce qui se produit dans les vases communicants : une branche haute descend et en fait monter une autre plus basse ; l'énergie potentielle de l'ensemble est ainsi réduite (le centre de gravité de la masse liquide descend). La portée de cette explication est très large ; elle permet, par exemple, de considérer le phénomène de la poussée d'Archimède comme une simple manifestation de la gravitation qui agit sur des corps qui tendent à occuper une même place. En effet, on peut dire qu'un corps immergé remontera à la surface (augmentant ainsi son énergie potentielle) si, ce faisant, il permet à une masse plus importante de fluide de prendre sa place, diminuant ainsi l'énergie potentielle de l'ensemble. Cette même explication s'applique dans le cas d'un ballon gonflé à l'hélium ou d'une montgolfière : la masse du ballon est inférieure à celle de l'air qu'il déplace ; lorsque le ballon monte et cède sa place à la masse d'air, l'énergie potentielle de l'ensemble est réduite.

En deuxième lieu, il s'agit d'expliquer la manière selon laquelle s'effectue cet écoulement, ce que nous ferons au moyen de l'analyse qualitative du comportement de la situation de la figure 7. En fait, le processus d'écoulement est quelque peu surprenant : dans un premier temps, les branches A et C se vident conjointement vers B jusqu'à ce que les niveaux de B et C soient égaux. Ensuite, la branche A continue à se vider, faisant alors monter B et C ensemble, jusqu'à l'état final d'équilibre. Comme l'indique le graphique, le moment du passage d'une phase à l'autre correspond à l'intersection des courbes B et C.

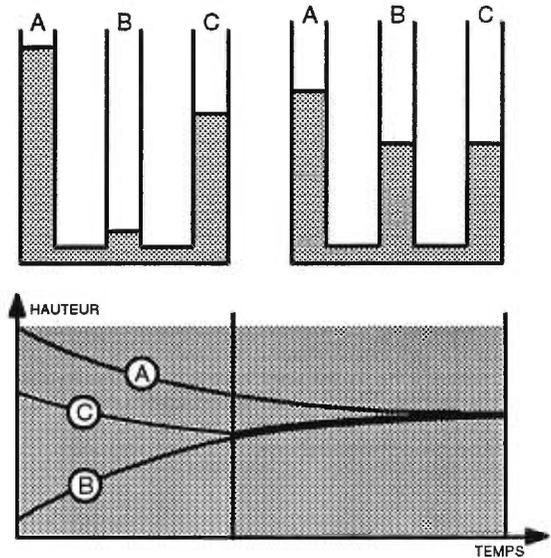


Figure 7. Écoulement des liquides dans les vases communicants.

Si nous observons le comportement d'un système de vases communicants comportant un conduit avec une restriction, nous constaterons que le débit dans cette branche sera réduit ; par le fait même, le comportement du système change. Ainsi, dans le cas de la figure 8 les conduits A et C ont d'abord tendance à se vider vers B, mais l'étranglement empêche la montée libre de cette branche. Dès lors, seulement une partie du débit de A se vide vers B ; le reste se dirige vers C. Cette première phase se poursuit

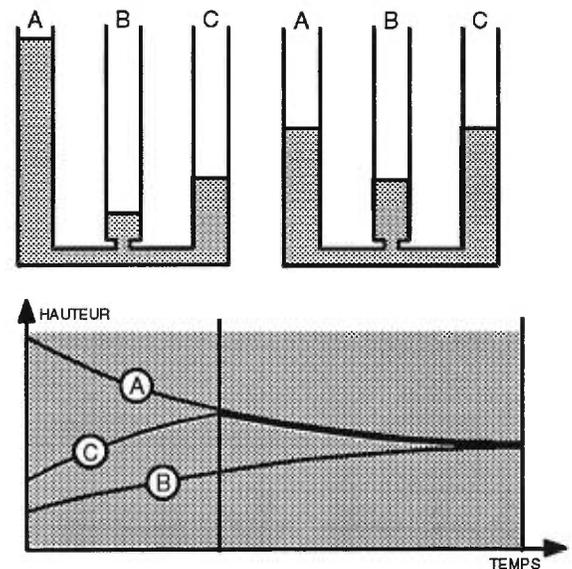


Figure 8. Vases communicants avec restriction. Cas 1

jusqu'à ce que A et C soient au même niveau. Ensuite, les branches A et C descendent ensemble et remplissent graduellement B, jusqu'à la stabilisation des trois niveaux.

Dans le cas de la figure 9
 premièrement les branches A et B
 se vident vers C ; toutefois, la
 descente de B est ralentie par
 l'étranglement. Cette première
 phase se termine lorsque les ni-
 vaux de B et C sont à égalité.
 Dans une deuxième phase, A
 continue à descendre faisant alors
 monter B et C. Cependant, étant
 donné que B ne peut recevoir tout

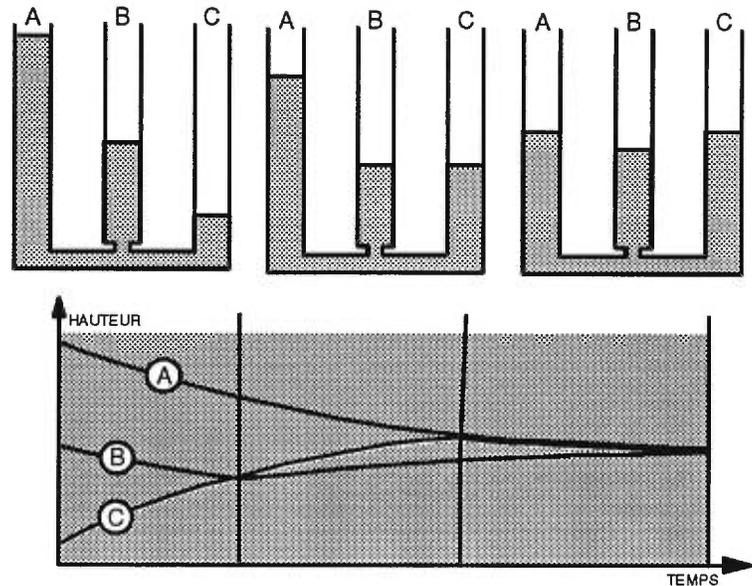


Figure 9. Vases communicants avec restriction. Cas 2

le débit venant de A , la branche C montera jusqu'à égalité avec A, créant une nouvelle condition de déséquilibre. Finalement, durant la troisième phase, A et C descendront ensemble et feront monter graduellement B jusqu'à la position finale d'équilibre.

Bien entendu, il existe plusieurs configurations possibles d'étranglements pouvant donner lieu à un grand nombre de situations différentes. On remarquera que, avec les étranglements, un même système de vases communicants peut donner lieu à plusieurs phases intermédiaires distinctes. Cependant, le comportement de chaque phase obéit aux mêmes règles. On remarquera aussi qu'il n'est pas aisé d'anticiper le comportement, somme toute assez complexe, des fluides dans les vases communicants sans en connaître l'ensemble des règles qui le sous-tendent. Bien que la loi des vases communicants exprime clairement la situation finale d'équilibre, elle n'est guère utile pour expliquer le comportement du liquide pour y parvenir.

À partir de l'analyse qualitative précédente, nous pouvons décrire ainsi ce comportement :

Toutes les branches descendent et remplissent celle qui a le plus bas niveau (moindre pression) ; cette branche monte alors jusqu'à égalité avec la branche qui a le deuxième plus bas niveau. Par la suite, ces deux branches reçoivent ensemble le débit et montent jusqu'à égalité avec la branche suivante, et ainsi de suite. Si la branche qui reçoit le débit présente une restriction, le débit excédentaire se dirige vers la branche suivante de plus bas niveau.

Cette description nous conduit à dégager les règles suivantes de l'écoulement des fluides :

- 1- *Tout fluide tend à couler vers un lieu de moindre pression.*
- 2- *Dans un collecteur (un embranchement), le liquide emprunte le conduit de moindre pression.*

Par ailleurs, les lois de la conservation de la matière et de l'incompressibilité des liquides nous permettent d'ajouter les deux règles suivantes :

- 3- *Dans un conduit, le débit d'un liquide est constant en tout point.*
- 4- *Dans un collecteur, la somme algébrique des débits qui entrent et qui sortent est nulle.*

En effet, si à un endroit donné d'un conduit il passe un certain débit, on doit le retrouver inchangé en tout autre point de ce même conduit ; autrement, il faudrait en conclure, soit que le conduit est en train d'accumuler du liquide et de gonfler, soit qu'il n'est pas étanche, soit qu'il est en train de se vider, ce qui ne serait pas compatible avec son rôle. Ce raisonnement s'applique aussi dans le cas d'un collecteur : la même quantité de liquide qui y entre doit nécessairement en sortir.

Finalement, une dernière règle de l'écoulement des liquides résulte aussi de la loi de la gravitation selon laquelle la pression exercée par une colonne de liquide, ainsi que la vitesse d'écoulement, sont fonction de la hauteur et du poids de cette colonne. Elle exprime le fait que l'écoulement est d'autant plus important que la dénivellation (ou la différence de pression) entre les colonnes de liquide est importante.

5- Dans un conduit, le débit d'un fluide est fonction du différentiel de pression en amont et en aval.

Pour ce qui est des systèmes pneumatiques, les règles de l'écoulement doivent tenir compte de la compressibilité des gaz et, conséquemment, du fait qu'ils tendent à occuper la totalité du volume de leur contenant. Les règles 2 et 3 s'exprimeront respectivement ainsi :

6- Dans un collecteur, le débit d'un gaz se répartit en fonction inverse de la pression de chaque conduit.

7- Dans un conduit, le débit massique d'un gaz est constant en tout point ; le débit volumique varie inversement avec la pression.

Cette dernière règle exprime la loi de la continuité de la matière, ce qui correspond au débit massique constant (en régime établi). Cependant, puisque, d'une part, tout écoulement implique un différentiel de pression et que, d'autre part, les gaz sont compressibles, le débit volumique doit nécessairement varier.

Le diagramme suivant (figure 10) illustre le réseau des liens qui existent entre chacune des règles de l'écoulement des fluides et les lois fondamentales de la physique.

LIENS ENTRE LES LOIS FONDAMENTALES ET LES RÈGLES D'ÉCOULEMENT DES FLUIDES

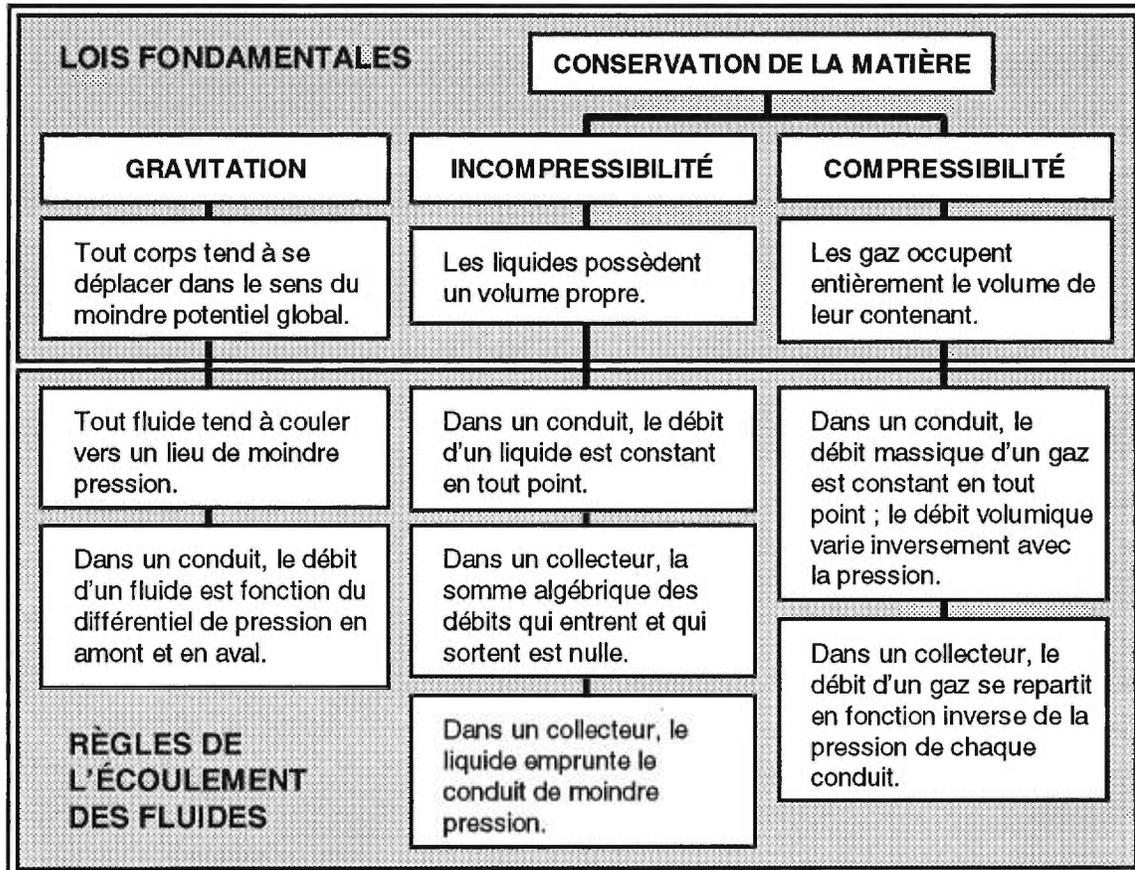


Figure 10. Liens entre les lois fondamentales et les règles d'écoulement des fluides.

3.2. LA FONCTION D'UN SYSTÈME D'ÉNERGIE DES FLUIDES

Nous abordons ici une analyse fonctionnelle des systèmes d'énergie des fluides selon une perspective systémique, tel que nous l'évoquions au chapitre IV portant sur les considérations théoriques.

En termes généraux, un système technologique sert à établir une relation prévisible entre les actions de commande qui s'exercent sur un appareil et le comportement de cet appareil. Ces actions de commande sont fournies au système au moyen d'organes d'entrée, tandis que le comportement du système se manifeste par des actions au niveau des organes de sortie de l'appareil, ce qui constitue le résultat de la fonction du système. La fonction globale du système s'exprime alors par la relation qui s'établit entre les données des organes d'entrée et ceux de sortie.

La fonction globale des systèmes hydrauliques et pneumatiques de puissance est de transmettre l'énergie nécessaire pour actionner des machines et équipements divers. Les données d'entrée sont le flux d'énergie et les diverses actions qui permettent de moduler ce flux. Le résultat est exprimé par le comportement des organes de sortie de la machine, en termes de variations de force, de couple, d'accélération et de vitesse.

Cette fonction globale peut être divisée en deux fonctions de base : la transmission de l'énergie et la modulation de cette énergie ; une troisième fonction que nous qualifierons de servitude parce que nécessaire mais non souhaitée, sert à assurer la stabilité thermique du système et le conditionnement du fluide. À leur tour, nous pouvons subdiviser ces trois fonctions en sous-fonctions :

1. SOUS-FONCTIONS RELIÉES À LA TRANSMISSION DE L'ÉNERGIE

1.1. TRANSFORMATION DE L'ÉNERGIE MÉCANIQUE EN ÉNERGIE FLUIDE. Elle s'effectue à partir du flux d'énergie mécanique transmis au système, générale-

ment par un moteur électrique ou à combustion interne, sous forme de vitesse de rotation et de couple. Ce flux est converti par une pompe, ou par un compresseur, en énergie fluide, sous forme de débit et de pression.

- 1.2. TRANSFORMATION DE L'ÉNERGIE FLUIDE EN ÉNERGIE MÉCANIQUE. Elle consiste à transformer le flux d'énergie provenant de la pompe ou du compresseur en énergie mécanique linéaire (force et vitesse) ou rotative (couple et vitesse de rotation). Le débit donnera la vitesse, tandis que la pression donnera la force ou le couple.
 - 1.3. DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE FLUIDE. Elle consiste à aiguiller la circulation du fluide dans les divers conduits du système. L'aiguillage se fait en ouvrant ou fermant les divers conduits.
 - 1.4. ACCUMULATION DE L'ÉNERGIE FLUIDE. Elle consiste à transformer l'énergie fluide en énergie potentielle lors de la phase d'accumulation, puis à la transformer à nouveau en énergie fluide lors de la phase de restitution. Il s'agit d'accumuler un volume de fluide sous pression et à le restituer au moment opportun pour produire un travail.
2. SOUS-FONCTIONS RELIÉES À LA MODULATION DE L'ÉNERGIE
- 2.1. MODULATION DE LA FORCE ET DU COUPLE. Elle s'effectue de manière indirecte en modulant la pression du fluide, puisque la force d'un vérin ou le couple d'un moteur est directement proportionnel à la pression.
 - 2.2. MODULATION DE LA VITESSE. Elle s'effectue aussi de manière indirecte en modulant le débit du fluide qui alimente un vérin ou un moteur, puisque leur vitesse est directement proportionnelle au débit.

3. SOUS-FONCTIONS AUXILIAIRES SERVANT À ASSURER LA STABILITÉ THERMIQUE DU SYSTÈME ET LE CONDITIONNEMENT DU FLUIDE

3.1. STABILITÉ THERMIQUE. Elle consiste à maintenir la température du système à l'intérieur de limites acceptables. Il s'agit, soit de refroidir, soit de réchauffer le système. La plupart du temps, ce qui pose problème c'est la montée excessive de température causée par la chaleur produite par les diverses pertes de rendement énergétique.

3.2. CONDITIONNEMENT DU FLUIDE. Elle consiste à filtrer le fluide afin de retenir les particules solides qui pourraient causer des problèmes de fonctionnement mécanique aux divers composants.

3.3. LA STRUCTURE FONCTIONNELLE D'UN SYSTÈME D'ÉNERGIE DES FLUIDES

L'approche systémique nous mène aussi à considérer la structure d'un système à partir de ses fonctions technologiques. Cette approche nous paraît à la fois plus simple, plus significative et plus fertile, en termes d'explication du comportement global, que l'approche traditionnelle basée sur le principe de fonctionnement des composants. La figure 11 présente la structure générale d'un système d'énergie des fluides selon cette perspective ; à chaque extrémité se trouvent les mécanismes auprès desquels s'exerce la fonction globale

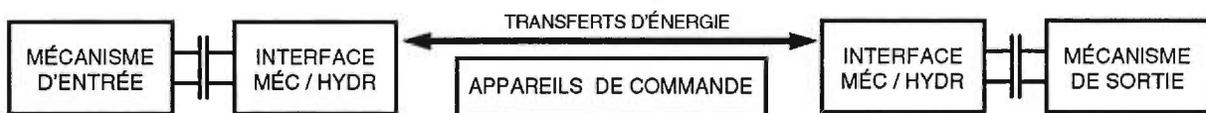


Figure 11. Structure générale d'un système d'énergie des fluides

de transmission d'énergie ; il s'agit d'appareils que nous appelons «interfaces» parce qu'ils sont en interaction directe avec les organes de la machine ; ils constituent, pour ainsi dire, la frontière entre la technologie mécanique et fluide (il s'agit des vérins, pompes et moteurs

volumétriques). Les interfaces transforment l'énergie mécanique (force et vitesse) en énergie fluide (pression et débit), et inversement, en vertu du principe de réversibilité dont nous traiterons à la section suivante ; plus important, elles établissent un lien direct entre la vitesse et le débit.

Entre les interfaces se trouvent les appareils de commande, que nous appelons «obstacles» parce que leur action consiste à empêcher la libre circulation du liquide et à le forcer à suivre le parcours voulu ; ils permettent de moduler l'énergie, c'est-à-dire de régler la pression et le débit, et par conséquent, la force et la vitesse du mécanisme de sortie (il s'agit des distributeurs, clapets, valves de pression et valves de débit).

Par ailleurs, on utilise des composants de conditionnement destinés à maintenir la température de fonctionnement entre des limites acceptables (refroidisseurs et réchauffeurs), et à maintenir le fluide libre d'impuretés (filtres) ; étant donné que leur rôle n'affecte, de manière significative, aucune des fonctions principales du système, ils n'interviendront pas explicitement dans la suite de notre analyse.

3.4. LE PRINCIPE DE RÉVERSIBILITÉ DES COMPOSANTS ET DES SYSTÈMES

La structure fonctionnelle précédente, nous conduit à remettre en question la conception courante selon laquelle chaque composant joue un seul rôle bien spécifique dans un système. Ainsi, on dit par exemple que le rôle de la pompe est de fournir un débit ; celui d'un moteur hydraulique, de créer un mouvement de rotation ; celui d'un vérin, de produire un mouvement linéaire ; celui d'un accumulateur, d'emmagasiner de l'huile sous pression. Bien entendu, ceci n'est pas faux, mais, selon nous, nettement insuffisant. Il faut tenir compte des interactions qui se produisent dans le système et particulièrement du principe de réversibilité, faisant en sorte que, par exemple, une pompe peut agir aussi comme un

moteur lorsqu'elle est soumise à une force menante¹, et inversement ; qu'un vérin peut agir aussi comme un accumulateur sous ces mêmes conditions. Il faut donc considérer que, potentiellement, ces composants sont à la fois émetteurs et récepteurs de débit.

Cette réversibilité des composants se répercute à l'ensemble du système. Comme nous le disions précédemment au sujet du schéma de la figure 10, le rôle d'un système hydraulique consiste, en termes généraux, à transmettre l'énergie d'un mécanisme à un autre. En fonctionnement normal, le mécanisme d'entrée actionne l'interface (habituellement une pompe) ; celle-ci prend du liquide dans un réservoir et le force à circuler dans le circuit. Ce liquide actionne l'autre interface (habituellement un vérin ou un moteur), laquelle entraîne le mécanisme de sortie. Le cycle se complète par le retour du liquide au réservoir. Le sens normal du transfert d'énergie est de gauche à droite. Cependant, lorsque le mécanisme de sortie est soumis à des forces menantes, le sens s'inverse, d'où l'importance de considérer ces systèmes comme étant essentiellement réversibles ; il convient d'en tenir soigneusement compte car des phénomènes inattendus et potentiellement dangereux et dommageables peuvent en résulter. Voici quelques exemples :

POMPE VOLUMÉTRIQUE : CONDITIONS NORMALES DE FONCTIONNEMENT

Une pompe soumise à l'action d'un moteur d'entraînement est destinée à produire un débit constant. Lorsque ce débit rencontre une résistance à son écoulement, il se crée une pression dans le circuit, laquelle génère un couple à l'arbre de la pompe qui tend à s'opposer au mouvement du moteur d'entraînement.

¹ Nous entendons par force menante celle qui tend à favoriser le mouvement, notamment celle produite par une charge gravitationnelle, par un corps soumis à des déformations élastiques (gaz sous pression, ressort comprimé...), par l'inertie d'une masse en décélération et par les moteurs d'entraînement (électriques ou autres). Inversement, une force résistante tend à s'opposer au mouvement ; elle est produite notamment par le frottement et par l'inertie d'une masse en accélération.

EFFETS DES FORCES MENANTES

1- En cas de baisse de tension ou de panne d'électricité, il y a baisse du couple du moteur d'entraînement. Alors, si dans le système il y a présence, soit d'un vérin soumis à une charge gravitationnelle, soit d'un accumulateur, la pression sera maintenue. Cette pression tendra à refouler le débit vers la pompe, la forçant à agir en tant que moteur et à tourner dans le sens contraire, en raison de la réversibilité de son mécanisme. Il en découle que la pompe peut être à la fois émettrice et réceptrice de débit.

2- Dans le cas d'une surcharge du système, il peut se produire une surpression qui génère un couple à la pompe plus important que celui du moteur d'entraînement, ce qui peut avoir pour effet de le bloquer, et même de l'entraîner dans le sens contraire.

MOTEUR VOLUMÉTRIQUE : CONDITIONS NORMALES DE FONCTIONNEMENT :

Un moteur hydraulique est destiné à produire un mouvement de rotation à partir du débit qu'il reçoit. Si son mouvement rencontre une résistance, celle-ci crée un couple à l'arbre, ce qui génère une pression dans le moteur qui tend à s'opposer à l'entrée du débit.

EFFETS DES FORCES MENANTES :

1- Dans un système comportant un moteur hydraulique avec un treuil et une charge suspendue, s'il y a surcharge du treuil, baisse de tension ou panne d'électricité, le couple au moteur hydraulique peut dépasser celui du moteur d'entraînement. Ceci forcera le moteur hydraulique à agir comme une pompe, aspirant l'huile dans le réservoir et le refoulant vers la pompe. Celle-ci sera alors forcée à agir comme un moteur et à tourner dans le sens contraire. La situation durera tant que la charge pourra descendre. Cette situation comporte des risques importants d'emballement et de surpressions dans le système. Il en découle que le moteur peut être à la fois récepteur et émetteur de débit.

2- Dans le cas d'une transmission hydrostatique à circuit fermé comportant une pompe à cylindrée variable, lorsqu'on réduit la vitesse de rotation du moteur hydraulique en réduisant la cylindrée de la pompe, l'inertie de la charge en mouvement tend à s'opposer à cette réduction et à maintenir le régime du moteur, ce qui le transforme en pompe. Le débit qu'il émet dans ces conditions force la pompe à agir comme un moteur et à s'accélérer, voire à s'emballer, ce qui peut causer d'importantes surpressions dans le système.

VÉRIN : CONDITIONS NORMALES DE FONCTIONNEMENT :

Un vérin est destiné à produire un mouvement linéaire à partir du débit qu'il reçoit. Si son mouvement rencontre une résistance, celle-ci génère une pression qui tend à s'opposer à l'arrivée du débit.

EFFETS DES FORCES MENANTES :

1- Lorsqu'un vérin en position verticale soulève une charge qui gravite sur sa tige, en cas de surcharge, baisse de tension ou panne d'électricité, la pression générée refoule de débit vers la pompe, la forçant à agir en tant que moteur, ce qui peut la faire tourner dans le sens contraire et causer la descente de la charge. Il y a des risques importants de surpressions et d'emballement. Il en découle que le vérin peut être à la fois récepteur et émetteur de débit.

2- Dans la situation précédente, même dans des conditions normales, lors de la descente, la vitesse de la charge peut facilement dépasser celle qui correspond au débit émis par la pompe. Ceci a pour effet de créer le vide dans la chambre supérieure du vérin et de permettre la descente incontrôlée et potentiellement très dangereuse de la charge.

3.5. ANALYSE DU COMPORTEMENT DES SYSTÈMES : APPROCHE BASÉE SUR LES VASES COMMUNICANTS

Nous abordons ici le troisième aspect de notre propos, ce qui nous conduira à proposer une nouvelle manière d'envisager les systèmes hydrauliques, basée sur les deux aspects que nous venons de traiter, soit le comportement du liquide dans les vases communicants, avec les règles de l'écoulement des liquides qui le sous-tendent, et le principe de la réversibilité des composants et des systèmes.

Selon cette conception, le système hydraulique simplifié de la figure 12 peut être assimilé, dans une première approche, au système de vases communicants de la figure 13. La hauteur des branches indique

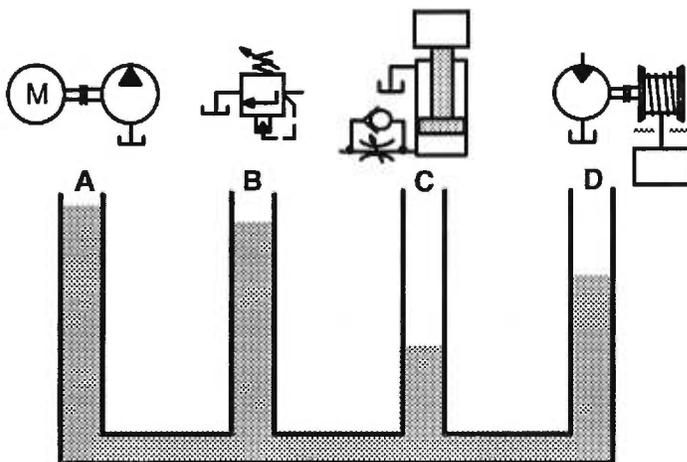


Figure 13. Système de vases communicants équivalent

de leur capacité d'émettre ou de recevoir un débit, ainsi que de pression maximale qu'elles peuvent générer. Dans l'exemple, les attributs seraient les suivants :

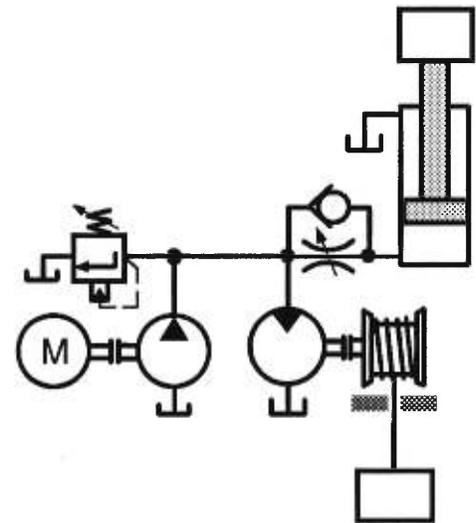


Figure 12. Système hydraulique simple.

la pression maximale que peut générer le composant (ou ensemble de composants) qu'elles représentent.

Nous pouvons assigner à chaque branche des attributs en fonction

BRANCHE A (ensemble pompe-moteur électrique) : le débit qu'elle peut émettre est constant, car il est fonction de la vitesse de rotation du moteur électrique et de la cylindrée de la pompe ; le débit qu'elle peut recevoir, en vertu de la réversibilité, est illimité ; la pression maximale que cette branche peut générer est fonction du couple du moteur et de la cylindrée de la pompe.

BRANCHE B (limiteur de pression) : le débit qu'elle peut émettre est nul puisque la nature même de ce composant fait en sorte que le débit est à sens unique, vers le réservoir ; le débit qu'elle peut recevoir est illimité ; la pression maximale qu'elle peut générer est fonction du réglage du limiteur.

BRANCHE C (ensemble vérin-charge-régulateur de débit) : le débit qu'elle peut recevoir est illimité, à cause du clapet anti-retour qui permet le libre passage vers le vérin ; par contre, le débit qu'elle peut émettre est fonction de l'ouverture du régulateur ; la pression maximale est fonction de la charge et de la surface du piston du vérin.

BRANCHE D (ensemble moteur hydraulique-treuil-charge) : le débit qu'elle peut émettre et recevoir est illimité ; la pression générée est fonction du couple à l'arbre et de la cylindrée du moteur.

L'ajout des clapets et des restrictions de la figure 14 permet de rendre plus amplement compte, en termes qualitatifs, de ces attributs, du sens de l'écoulement et de l'importance du débit qui sont possibles dans chacune des branches. Aussi, il convient de limiter la hauteur des branches en fonction de la pression qu'elles peuvent générer, ce

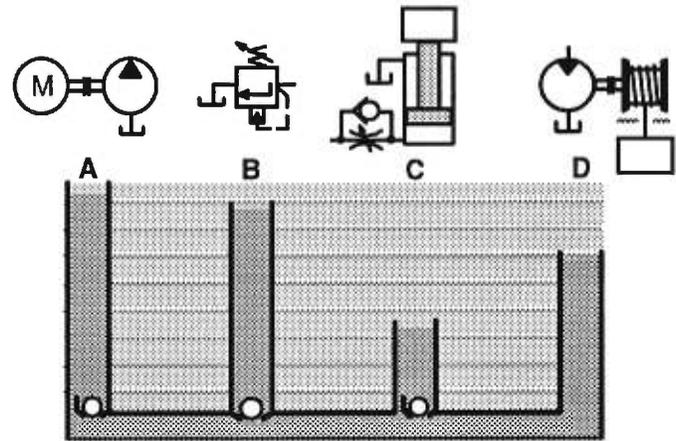


Figure 14. Système de vases communicants équivalent : phase 1

qui évite d'induire l'idée que le niveau et donc la pression peuvent monter dans les branches à mesure que celles-ci reçoivent un débit ; en limitant la hauteur, le liquide «déborde» et le niveau reste constant. Ceci correspond bien au fait que les composants reçoivent ou renvoient le liquide au réservoir.

La figure 14 permet d'amorcer une analyse qualitative relativement poussée du comportement du système. Elle indique notamment que les niveaux de pression permettent un fonctionnement normal du système ; en effet, le niveau de la branche A est le plus haut, c'est-à-dire que l'ensemble moteur-pompe permet de générer une pression supérieure à celle requise pour le fonctionnement des autres composants. La niveau de la branche B est légèrement inférieur, ce qui constitue une marge de sécurité car il limite l'effort du groupe moteur-pompe (branche A). En d'autres mots, si le réglage du limiteur de pression correspondait à un niveau supérieur à celui de la branche A, son débit ne pourrait pas passer par le limiteur de pression, ce qui bloquerait le moteur d'entraînement.

On peut observer aussi que la pression qui règne dans le système durant la phase illustrée est celle générée par la branche ayant le plus bas niveau, soit C. Dès lors, les branches A et D se vident vers C et font monter le vérin. En effet, au débit de la pompe s'ajoute celui généré par le moteur hydraulique qui est forcé à agir comme une pompe sous l'effet de la charge menante suspendue au treuil. Cette phase prend fin lorsque le vérin atteint la fin de course et qu'il ne peut plus recevoir le débit, ce qui est illustré par la fermeture de la branche C (figure 15). À noter que la pression maximale que cette branche peut générer demeure inchangée ; en revanche, elle peut maintenant résister à une pression illimitée.

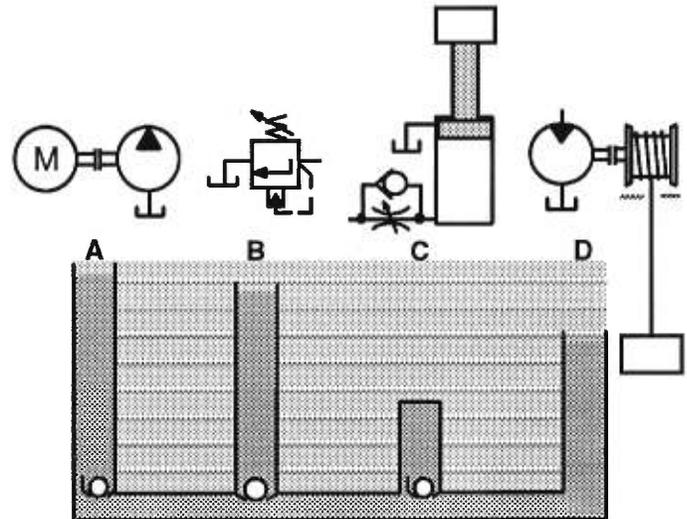


Figure 15. Système de vases communicants équivalent : phase 2

Durant la deuxième phase, la pression du système devient celle générée par la branche D. Celle-ci recevra donc le débit constant venant de la pompe ; le treuil fera monter la charge jusqu'à la butée, ce qui provoquera l'arrêt du moteur hydraulique et la fermeture de la branche D (figure 16). Durant la phase suivante, la pression du système sera celle générée par la branche B ; l'huile coulera désormais indéfiniment par le limiteur de pression.

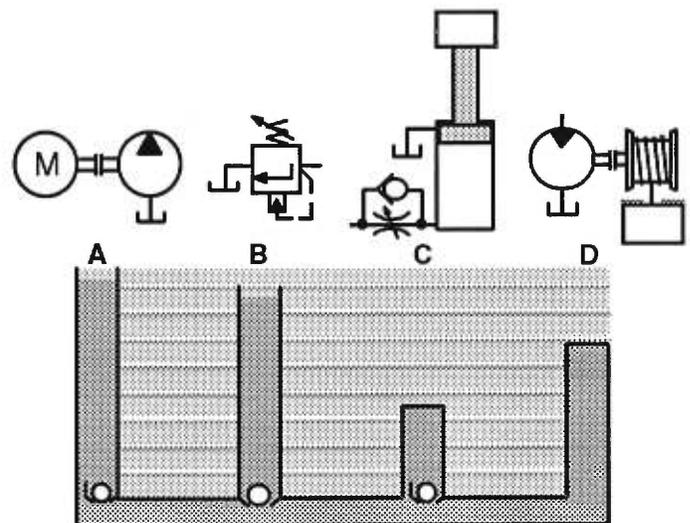


Figure 16. Système de vases communicants équivalent : phase 3

Il est important d'insister sur le fait que, dans tous les cas, les niveaux illustrent la pression maximale que peut éventuellement générer chaque branche. Toutefois, pendant le déroulement de chaque phase, la pression dans le système est celle générée par la branche qui reçoit le débit, soit celle du plus faible niveau.

3.6. LA MORPHOLOGIE DES CIRCUITS

En poursuivant selon notre optique des vases communicants, l'analyse d'un système débute par l'identification des branches et des collecteurs. Les branches sont des passages² dont une extrémité est reliée à un réservoir ou à un accumulateur, et l'autre à un collecteur³. Autrement dit, chaque réservoir et chaque accumulateur constitue, pour ainsi dire, l'aboutissement d'une branche. En remontant de proche en proche à partir de cette extrémité, tout composant relié en série fait partie de la même branche ; celle-ci se termine lorsqu'on rencontre un embranchement. Cet embranchement constitue le collecteur ; ses frontières s'étendent dans tous ses embranchements jusqu'à la rencontre d'un composant, lui-même étant le point de départ d'une autre branche.

Dans certains cas, le composant qui est à la frontière du collecteur n'est pas le point de départ d'une véritable branche car le passage n'aboutit pas à un réservoir ou à un accumulateur mais à un autre collecteur ; ce passage constitue une branche secondaire. Chacun de ces collecteurs, avec ses branches, constitue alors un sous-système de vases communicants indépendant. Leur comportement restera séparé jusqu'à ce que les conditions

² Nous entendons par passage, un ensemble de conduits, interfaces ou obstacles reliés en série et par lesquels le liquide peut circuler s'il satisfait aux conditions imposées par ces composants.

³ Nous entendons par collecteur, un ensemble de conduits reliés de manière à former des embranchements (au moins trois conduits formant une bifurcation) et entre lesquels le liquide peut circuler librement.

qui prévalent dans l'un ou l'autre des sous-systèmes répondent aux exigences imposées au passage du liquide par la branche secondaire qui les relie.

3.7. L'ALGORITHME

Ce dernier élément du cadre théorique rend explicites, sous forme d'un algorithme général, les étapes du processus d'analyse du fonctionnement des systèmes hydrauliques et pneumatiques. L'algorithme permet d'opérationnaliser de manière cohérente et structurée les divers aspects évoqués. Le niveau de langage employé permet de l'utiliser directement à des fins didactiques.

<u>ÉTAPE</u>	<u>DESCRIPTION</u>
1	Identification des branches :
2	Identifier chaque réservoir et chaque accumulateur comme étant l'extrémité d'une branche.
3	À partir de chaque extrémité, identifier tous les obstacles qui lui sont reliés en série comme appartenant à la branche.
4	Lorsqu'on rencontre un embranchement, identifier le dernier obstacle comme étant l'extrémité de la branche et la frontière du collecteur.
5	Identifier si le collecteur comporte des embranchements autres que les extrémités des branches.
6	Si oui, les identifier en tant que systèmes de niveau secondaire.
7	Reprendre les étapes 1 à 5 pour chaque système de niveau suivant.
8	Pour chaque branche de chaque système :
9	Déterminer la pression qu'elle peut générer.
10	Déterminer le débit qu'elle peut émettre et recevoir.

- 11 Assigner le débit émis par toutes les branches à celle qui peut générer la plus basse pression, jusqu'à saturation du débit qu'elle peut recevoir.
- 12 S'il y a débit excédentaire, l'assigner à la branche qui peut générer la plus basse pression suivante, et ainsi de suite jusqu'à la totalité du débit.
- 13 Assigner à chaque branche qui reçoit un débit la pression qu'elle peut générer.
- 14 Assigner à toutes les autres branches la pression générée par la dernière branche qui reçoit un débit.
- 15 Assigner à chaque interface le mouvement qui correspond au débit qu'elle reçoit.
- 16 La situation courante prend fin lorsque :
 - 17 La morphologie d'un collecteur change suite à l'action d'un obstacle,
 - 18 Une interface arrive en fin de course ou intercepte une nouvelle charge,
 - 19 La pression générée par la dernière branche qui reçoit un débit atteint celle que peut générer une autre branche.
- 20 Nouvelle situation : retour à l'étape 1.

4. CONCLUSION

En raison de sa complexité, l'utilisation didactique de cet algorithme peut s'avérer problématique, particulièrement au début de l'apprentissage. Il est probable qu'une approche plus explicitement basée sur les vases communicants soit alors plus bénéfique. Nous croyons que l'algorithme peut constituer un support pour analyser le comportement de systèmes complexes, voire pour articuler une synthèse générale du fonctionnement des systèmes. Une éventuelle mise à l'essai formelle permettra de faire la part des choses. Pour l'heure, l'algorithme constitue, selon nous, un moyen formel permettant d'explicitier et de formaliser ce fonctionnement.

Pour ce qui est de l'ensemble du cadre théorique, son élaboration constitue, d'une certaine manière, un produit inattendu par son étendue et sa portée ; il a pris forme progressivement, tout au long de notre démarche consistant à réaliser l'environnement d'apprentissage qui est au centre de cette thèse. D'abord plus ou moins implicite, il a été formalisé vers la fin de la démarche, c'est pourquoi nous n'avons pas procédé à sa mise à l'essai conjointement avec le logiciel. Cependant, il est clair que le comportement des systèmes est en pleine conformité avec ce cadre, ce qui constitue, en soi, un indice formel, sinon une preuve indirecte de sa validité fonctionnelle. En fait, on peut vérifier expérimentalement la validité des divers éléments du cadre théorique au moyen de simulations. Bien entendu, ceci relève du raisonnement circulaire en ce sens que les deux peuvent être erronés tout en étant cohérents, mais, comme nous le verrons dans le chapitre suivant portant sur les mises à l'essai du prototype, la validité fonctionnelle du simulateur est établie.

Par ailleurs, nous estimons que l'environnement d'apprentissage et le cadre théorique se justifient l'un indépendamment de l'autre ; pour ainsi dire, l'environnement d'apprentissage, particulièrement pour ce qui est de sa forme, est tributaire du niveau technologique du moment (vitesse de traitement, environnement graphique, etc.) ; il y a quelques années, sa réalisation aurait été à toutes fins pratiques impossible alors que dans quelques années il ne sera vraisemblablement plus d'actualité. Par contre, la portée du cadre théorique, particulièrement pour ce qui est des règles de l'écoulement des fluides, nous semble plus indépendante du temps.

CHAPITRE VIII

LES MISES À L'ESSAI DU PROTOTYPE

1. LES MISES À L'ESSAI DU PROTOTYPE

Nous présentons, dans ce chapitre, la démarche et les résultats obtenus lors des deux mises à l'essai du premier prototype de l'environnement d'apprentissage et des situations expérimentales d'apprentissage que nous avons réalisées avec Hydro+Pneu[©].

La première de ces mises à l'essai, à caractère essentiellement fonctionnel, a été faite auprès d'enseignants et de spécialistes industriels de la discipline ; elle avait pour objectif de vérifier le bien-fondé des principales orientations que nous poursuivions, la pertinence du traitement qui en était fait et de la manière dont on rendait compte des situations mises à contribution, ainsi que l'exactitude des aspects théoriques abordés.

La deuxième mise à l'essai, de type empirique, a été réalisée auprès d'étudiants ; elle avait pour objectif d'analyser les interactions qu'ils établissaient entre l'environnement d'apprentissage et les situations expérimentales qui leur étaient proposées, ainsi que l'utilisation qu'ils en faisaient. Nous voulions vérifier l'intérêt que suscitait chez eux cet environnement, identifier les apports qu'il pouvait constituer et évaluer empiriquement son incidence sur les apprentissages qu'ils réalisaient.

Il faut préciser que la plupart des observations faites lors de ces mises à l'essai ont servi à l'amélioration progressive du prototype, à mesure que prenaient forme les diverses versions ; on comprendra donc que la plupart des difficultés ou problèmes que nous avons rencontrés au cours de ces mises à l'essai ne se retrouvent plus dans le produit final. Par ailleurs, pour ce qui est de la mise à l'essai empirique, compte tenu du nombre restreint d'étudiants impliqués (une quinzaine), les résultats obtenus, quoique précieux et très signifi-

catifs du point de vue qualitatif, ne sauraient avoir qu'une valeur indicative du point de vue quantitatif ; seule une mise à l'essai élargie et systématique permettrait de les valider.

2. LA MISE À L'ESSAI FONCTIONNELLE

Cette mise à l'essai a été faite pour le premier prototype et pour les situations expérimentales d'apprentissage réalisées avec Hydro+Pneu[©]. Avec le premier, nous avons cherché surtout à connaître, de manière globale, si les principales orientations du logiciel étaient pertinentes. Avec les deuxièmes, nous avons cherché à vérifier, de manière plus approfondie, si les aspects théoriques qui sous-tendent le comportement des systèmes était traité de manière pertinente et exacte du point de vue disciplinaire. Par la fait même, nous avons réalisé la mise à l'essai fonctionnelle du logiciel Hydro+Pneu[©].

2.1. LA MISE À L'ESSAI FONCTIONNELLE DU PREMIER PROTYYPE

Trois professeurs de l'ordre collégial et un de l'universitaire ont été mis à contribution de manière plus ou moins informelle à divers stades du développement du premier prototype. Ils ont été invités, à plusieurs occasions, à se prononcer sur la validité des comportements des systèmes, particulièrement pour ce qui est des phénomènes impliqués et du traitement qui en était fait, c'est-à-dire la manière dont ils étaient traités du point de vue théorique, mais aussi de leur conformité par rapport aux comportements observés en relation avec les systèmes réels. Ils ont tous reçu, pour chaque occasion, une copie de la dernière version disponible du prototype, incluant des systèmes déjà élaborés qu'ils étaient invités à expérimenter, à modifier, à en construire de nouveaux, etc.

Les résultats de cette première démarche ont été, dans l'ensemble, plutôt positifs. Pour ce qui est du traitement théorique, quelques erreurs d'ordre mathématique nous ont

été signalées mais aucune se rapportant aux aspects conceptuels proprement dits. Cependant, on nous a fait quelques commentaires sur la pertinence d'illustrer certains phénomènes plutôt inhabituels et de leur importance par rapport à d'autres qui n'étaient pas traités.

Cette mise à l'essai a surtout fait ressortir l'importance d'un problème que nous connaissions déjà, mais pour lequel nous n'avions pas encore trouvé de solution, relativement au comportement erroné du simulateur lorsque, dans un circuit, il y avait des embranchements (noeuds) dans les conduits.

Par ailleurs, de manière générale, les commentaires étaient très favorables. En référence à d'autres logiciels existants, on soulignait l'importance de travailler en temps réel et de la prise en charge des aspects énergétiques (précisons que ce premier prototype restait encore fort limité à cet égard).

Du point de vue de nos objectifs de recherche, cette première mise à l'essai nous a surtout permis de clarifier les principaux problèmes d'ordre technologique auxquels nous serions confrontés lors du développement du deuxième prototype. Aussi, avant poursuivre les travaux, nous avons voulu valider notre perception des priorités. C'est ainsi que nous avons fait appel, à nouveau, aux trois professeurs du collégial afin qu'ils participent à une rencontre visant à déterminer la pertinence des orientations et des changements que nous envisagions. À cette fin, ils ont reçu préalablement un document de fond portant sur les objectifs de la réunion et les grandes lignes des orientations à considérer. Ce document est présenté à l'annexe II. Nous avons demandé leur avis sur les aspects qu'ils considéraient positifs ou négatifs, ainsi que leurs suggestions pour les améliorer. Nous avons cherché à élucider plus particulièrement les aspects suivants :

1. Dans quelle mesure est-il pertinent de créer un environnement informatisé d'apprentissage sous forme d'un laboratoire virtuel d'expérimentation ?
2. Dans quelle mesure est-il pertinent d'inclure, dans un tel environnement, les technologies hydraulique et pneumatique ?
3. Dans quelle mesure est-il pertinent de traiter le phénomène du vide et les effets des charges menantes ?
4. Dans quelle mesure est-il pertinent d'inclure un éditeur de leçons et un tutoriel ?
5. Dans quelle mesure les aspects liés à la transmission de puissance doivent-ils être traités en priorité par rapport à ceux reliés aux circuits de commande ?

Les participants ont exprimé souvent leur étonnement, voire de sérieux doutes pour ce qui est de la possibilité qu'un tel simulateur puisse prendre en considération un aussi large éventail de variables et de situations. Au delà de cet aspect général, des réserves se sont aussi manifestées relativement à la pertinence de créer un environnement d'apprentissage qui serait assimilable à un laboratoire virtuel d'expérimentation ; les commentaires allaient d'un certain scepticisme à une mise en garde sur l'importance de le faire de manière suffisamment complète pour que les simulations soient crédibles (ici encore, le premier prototype était assez embryonnaire).

Pour ce qui est de la pertinence d'inclure, dans un même simulateur, les technologies hydraulique et pneumatique, les commentaires étaient partagés, voire plutôt défavorables. Les raisons évoquées tenaient au fait que cette situation serait plutôt inattendue de la part des professeurs et que les deux technologies semblaient difficilement conciliables du point de vue de leur faisabilité technologique, au sens des algorithmes informatiques, car l'une implique un fluide incompressible et l'autre pas. Nonobstant ces avis, nous avons décidé de

maintenir notre orientation originale pour les raisons suivantes : nos travaux sur les fausses représentations (Cervera et al., 1993) indiquaient précisément que les étudiants confondent ces deux technologies et qu'ils n'arrivent pas à dissocier le concept de pression de celui de compressibilité, même dans le cas des liquides, pourtant considérés incompressibles par les étudiants. Dès lors, ils nous semblait important qu'ils puissent observer et expérimenter, simultanément, de manière contiguë et dans un même environnement d'apprentissage, les différences entre les deux technologies. De plus, bon nombre de concepts sont communs aux deux technologies et elles utilisent, en grande partie, la même symbologie et la même nomenclature. C'est pourquoi elles sont souvent traitées dans le cadre d'un même cours. La question qui restait donc à élucider était celle de la faisabilité informatique. La suite des travaux a démontré la viabilité de cette orientation.

Concernant la pertinence de traiter le phénomène du vide et les effets des charges menantes, les opinions étaient partagées aussi. Il y avait un certain consensus pour ce qui est des charges menantes mais, pour ce qui est du vide, on exprimait généralement des doutes, voire de l'incompréhension. La phrase suivante illustre l'essentiel des arguments évoqués : *« dans un système bien conçu il n'y a pas de situations qui produisent le vide »*. Bien entendu, nous partageons cet avis mais, selon nous, il s'agissait plutôt de savoir comment les étudiants pouvaient arriver à bien concevoir de tels systèmes alors qu'ils ne sont pas encore des experts et qu'ils devraient pouvoir expérimenter ces situations problématiques. En fait, selon nous, il est important de bien distinguer la phase d'apprentissage de celle de la conception ; dans la première, il s'agit essentiellement de confronter les étudiants au comportement des systèmes, fussent-ils mal conçus, afin qu'ils comprennent les raisons et les causes de ce comportement et d'en constater les implications, tandis que dans la phase de conception il s'agit de mettre à contribution la synthèse des connaissances et expertises acquises.

Par ailleurs, il nous apparaît significatif que, lorsque nous questionnions les professeurs sur la manière de traiter les charges menantes sans considérer la possibilité qu'elles causent le vide dans les systèmes, on convenait facilement que c'était incontournable. Selon nous, les réticences entourant ce phénomène proviennent de la difficulté d'observer le vide de manière expérimentale. Or c'est précisément par rapport à ce type de difficultés que s'inscrit cette recherche : nous pensons que la simulation devrait permettre de rendre compte à la fois du phénomène du vide et de ses répercussions sur le fonctionnement des composants et donc des systèmes. Autrement dit, la simulation devrait permettre d'extrapoler les effets du phénomène sur les systèmes réels, sans encourir les risques techniques et économiques qu'il comporte. C'est pourquoi nous avons retenu que le concept du vide était important et avons décidé de simuler ce phénomène, d'autant plus qu'il intervient dans le modèle explicatif du fonctionnement de composants essentiels tels les vérins, les pompes et les moteurs volumétriques.

Pour ce qui est de l'opportunité d'inclure un éditeur de leçons et un tutoriel dans le simulateur, de manière assez unanime, on estimait qu'il n'était pas très pertinent. On préférait que chaque professeur puisse élaborer ses propres situations expérimentales et, le cas échéant, des leçons. Nous acquiesçons à cet avis, d'autant plus que l'élaboration d'un tutoriel impliquerait notamment la création d'un éditeur de boutons de dialogue et des moyens informatiques assez complexes pour saisir et analyser les réponses des étudiants, ce qui aurait pu s'avérer prohibitif en termes de temps de développement. Nous avons décidé d'inclure plutôt un éditeur de texte qui permettrait aux enseignants d'élaborer des mises en situation ou des contenus théoriques complémentaires pour accompagner les situations expérimentales.

Finalement, pour ce qui est de l'importance relative à accorder aux aspects reliés à la transmission de puissance par rapport à ceux reliés aux circuits de commande, les com-

mentaires faisaient ressortir l'importance du premier pour ce qui est de l'hydraulique ; cependant, pour la pneumatique, si elle devait être incluse, les deux aspects seraient importants. Nous avons donc adhéré à cette proposition et décidé d'ajouter les aspects reliés aux circuits de commande.

Du point de vue de nos objectifs de recherche, nous retenions particulièrement de ces commentaires que l'envergure du produit final devait s'élargir afin de tenir compte d'un très grand nombre de phénomènes et de variables. Autrement dit, si nous voulions que l'environnement d'apprentissage rende compte d'un comportement suffisamment proche de celui des systèmes réels, nous devons élargir, de manière substantielle, l'éventail des phénomènes et des capacités du simulateur.

Pour ce qui est de la validité du comportement fonctionnel du premier prototype, la mise à l'essai a fait ressortir une faiblesse importante pour ce qui est de la manière dont le fluide se distribuait dans les branches. Lorsqu'il y avait présence d'un embranchement dans un circuit, le comportement était erroné.

En résumé, outre le constat de l'erreur inhérent à la présence de noeuds, cette première mise à l'essai fonctionnelle nous a permis de valider la pertinence et de bonifier la plupart des orientations de départ de l'environnement informatisé d'apprentissage que nous projetions, tout en faisant ressortir l'importance d'élargir et d'approfondir les aspects qui permettraient d'augmenter le réalisme et la crédibilité des simulations. Bien entendu, cette situation nous engageait dans une voie de développement beaucoup plus exigeante, mais qui s'annonçait aussi porteuse de nouvelles possibilités..

2.2. LA MISE À L'ESSAI FONCTIONNELLE DES SITUATIONS EXPÉRIMENTALES D'APPRENTISSAGE ÉLABORÉES AVEC HYDRO+PNEU[©]

Cette mise à l'essai fonctionnelle avait surtout pour finalité de valider la pertinence du traitement techno-scientifique qui était fait par Hydro+Pneu[©] des situations expérimentales, ainsi que l'exactitude des fondements théoriques des aspects abordés. Il s'agissait, en somme, de questionner la validité des comportements produits par le logiciel, aux points de vue disciplinaire et didactique.

Pour ce qui est du point de vue disciplinaire, durant l'élaboration des premières situations expérimentales, nous possédions déjà de sérieux indices à l'effet que le comportement du simulateur correspondait adéquatement à la réalité. En effet, au cours de multiples essais, nous avons constaté que plusieurs situations complexes réagissaient de manière semblable à celle des systèmes réels. Ainsi, par exemple, une transmission hydrostatique à circuit fermé, ne fonctionnait correctement que s'il y avait une pompe de gavage ; ce comportement correspond sensiblement à ce qui se produit dans les systèmes réels, dans des conditions semblables. Un deuxième exemple concerne un système avec des vérins en parallèle ; selon l'importance des forces et des masses impliquées, les accélérations des vérins varient de manière généralement prévisible ; cependant, certaines situations peuvent confronter l'utilisateur à des résultats inattendus qui demandent une attention particulière avant qu'on admette leur validité. Un dernier exemple concerne l'utilisation de composants dont le passage de fluide s'ouvre au moyen d'une pression de pilotage en amont. Lorsque le composant est fermé, la pression en amont augmente, ce qui fait ouvrir le passage ; or, cette ouverture cause la chute de la pression de pilotage, ce qui, à son tour, produit la fermeture du passage. Le système risque alors d'osciller continuellement, sans atteindre une situation d'équilibre. Ces situations, bien connues dans la pratique, sont souvent résolues de ma-

nière empirique, simplement en modifiant la sensibilité ou le temps de réaction du pilotage. Ce qui s'avère intéressant dans le cas du simulateur, c'est que le même type de situations produit les mêmes phénomènes, et que l'on peut les résoudre de manière analogue.

Ce type de situations pose la question de la valeur didactique d'un simulateur qui rend compte d'un comportement somme toute peu fréquent en hydraulique et pneumatique. D'une part, il est clair que nous n'avons pas cherché explicitement à illustrer le phénomène de l'oscillation ; d'autre part, son apparition constitue à la fois une conséquence heureuse et un sérieux indice de la valeur technologique des modèles qui déterminent le comportement du simulateur. Autrement dit, la mise en évidence de ce phénomène, étudié par lui-même en électricité et électronique pour la construction d'oscillateurs, même s'il dépasse les besoins didactiques des utilisations courantes, permet d'identifier des situations potentiellement problématiques qui comportent un grand intérêt lors de la conception de systèmes.

Ces exemples indiquent aussi, selon nous, que le comportement du simulateur illustre, non seulement le fonctionnement des systèmes selon, pour ainsi dire, un premier niveau du modèle explicatif, mais qu'il permet de déceler et d'anticiper des phénomènes et des comportements qui relèvent d'un niveau assez avancé. À cet égard, nous pensons que les capacités technologiques du logiciel Hydro+Pneu[©] le rendent apte en tant que support aux apprentissages, mais aussi pour la conception et le diagnostic de fonctionnement de systèmes réels dans un contexte industriel.

Ceci nous a été confirmé par des avis recueillis auprès d'experts d'industries et de centres de recherche appliquée auprès desquels nous avons réalisé des présentations de situations expérimentales significatives de systèmes industrielles. De manière générale, dès les premiers moments de la présentation, les simulations produites par Hydro+Pneu[©]

suscitaient un grand intérêt, voire de l'enthousiasme. On nous a souligné particulièrement le nombre important de variables impliquées, le réalisme des phénomènes illustrés, la grande facilité d'utilisation et la possibilité de construire des graphiques qui montrent les interrelations entre les variables en temps réel. On a constaté rapidement que les simulations permettaient d'accéder à une compréhension en profondeur du comportement des systèmes. Plusieurs personnes nous ont demandé à ce que l'on modifie des paramètres de simulation afin d'en vérifier l'exactitude sous diverses conditions ; on voulait tester ainsi la «solidité» du logiciel et on tentait de le mettre en défaut.

Ces démarches nous ont permis de constater que les personnes expertes dans le domaine étaient parmi les plus enthousiastes face aux performances du logiciel. Nous avons recueilli des propos tels que *«Enfin nous pouvons observer les phénomènes que nous savions qui se produisent...»*, *«Voilà la confirmation des situations que nous avons rencontrées»*, *«C'est précisément ce que nous enseignons à nos collègues débutants»*. Ces réactions, même si elles sont préliminaires et informelles, nous indiquent que Hydro+Pneu[©] constitue un produit qui répond largement aux objectifs que nous nous étions fixés concernant le réalisme et la crédibilité des simulations, en regard du comportement des systèmes industriels complexes. Ceci assure une valeur didactique intrinsèque aux situations expérimentales d'apprentissage que nous avons développées et mises à l'essai au moyen de ce logiciel.

Notre démarche de mise à l'essai a été complétée par une vérification assez exhaustive du comportement d'un nombre important de systèmes. Ces systèmes provenaient de sources diverses, notamment de volumes, notes de cours et cahiers d'exercices de professeurs du collégial et universitaire. La plupart d'entre eux constituaient des exemples de situations réelles et étaient développés au plan théorique, incluant tous les calculs associés.

Cette vérification nous a permis de déceler quelques erreurs, somme toute mineures, dans le comportement de quelques composants, erreurs qui ont été facilement corrigées.

En conclusion, nous pouvons affirmer que, au plan disciplinaire, la mise à l'essai des situations d'apprentissage développées avec Hydro+Pneu[©] nous a permis de constater sa capacité de rendre compte, d'une manière assez avancée, de la complexité des comportements qui se produisent dans les systèmes réels. Aucune remarque portant sur d'éventuelles erreurs quant au traitement des phénomènes ne nous a été rapportée. Par contre, nous avons identifié quelques erreurs concernant le comportement de quelques composants et la nécessité de procéder à des ajustements. Aussi, on nous a suggéré des changements concernant particulièrement les valeurs proposées par défaut et les valeurs limites des capacités de certains composants, et la manière de représenter ceux dont le symbole n'est pas normalisé.

3. LA MISE À L'ESSAI EMPIRIQUE

À l'instar de la mise à l'essai fonctionnelle, la mise à l'essai empirique avec des étudiants a été faite avec le premier prototype et avec les situations d'apprentissage. Dans les deux cas, à mesure que les différentes versions prenaient forme, nous avons cherché à atteindre ce qui, à notre avis, présentait la meilleure adéquation possible entre le matériel et l'utilisateur. Nous avons systématisé les expérimentations avec un ou deux étudiants à la fois et avons observé leur attitude face aux situations expérimentales que nous leur proposons.

Chacune de ces mises à l'essai a mis à contribution une quinzaine d'étudiants du collège de Valleyfield, inscrits au programme régulier de *Techniques de génie mécanique*. Ils avaient tous déjà complété le cours *Énergie des fluides 241-520* (ou l'équivalent), obligatoire dans le programme en question. De plus, ils étaient déjà relativement familiers avec le logi-

ciel car, durant leur cours, ils avaient déjà réalisé quelques expérimentations et assisté à des démonstrations ponctuelles. Nous avons retenu des étudiants qui, au cours d'entretiens informels préalables, tenaient des propos qui montraient la persistance de représentations erronées au sujet des principaux concepts de la discipline.

Lors des mises à l'essai, nous leur avons présenté des situations expérimentales qu'ils devaient régler et modifier afin d'obtenir les comportements demandés. Ces situations faisaient appel à une compréhension essentiellement qualitative des phénomènes mis en cause. Nous avons évité systématiquement les questions faisant appel à la mémorisation ou à l'utilisation de formules et calculs complexes. Chacune des situations pouvait être considérée, du point de vue disciplinaire, comme étant simple, c'est-à-dire comprenant peu d'éléments et faisant appel aux connaissances et aux concepts de base.

Tout en demeurant simples, les situations devaient nous permettre d'observer la démarche des étudiants relativement à un large éventail de concepts. Nous désirions ainsi, moyennant un questionnement épistémologique articulé autour d'un protocole ouvert, voir comment ils structuraient leur travail et comment ils faisaient appel aux diverses fonctions du logiciel ; nous cherchions particulièrement à connaître leur interprétation des phénomènes et leur compréhension des comportements observés.

La nature même de cette démarche relève d'une approche clinique, semblable à celle couramment pratiquée en recherche-action, avec observation semi-structurée et prise de données qualitatives. L'objectif visé n'était donc pas de procéder à une expérimentation systématique qui permettrait de quantifier les résultats dans le but de valider, de manière statistiquement significative, les hypothèses de départ. Il s'agissait plutôt d'analyser, de comprendre et de questionner le comportement des étudiants face aux situations expérimentales que nous leur proposons, afin de mettre en lumière les fondements épistémologi-

ques, les structures conceptuelles qu'ils mettaient à contribution, ainsi que les enchaînements qu'ils effectuaient et les interactions qui se produisaient avec le simulateur.

Cette démarche s'inspire aussi du modèle de développement technologique en éducation de Nonnon (1987). L'auteur précise que l'étape de la mise à l'essai empirique d'un prototype est de la plus haute importance et propose l'approche suivante :

« Il s'agit de provoquer des interactions entre les élèves, le chercheur et le prototype, de manière à induire des actions structurantes. Pour ce faire, on utilise une méthode dialectique entre l'élève et le professeur-chercheur, de manière à faire apparaître, [...] des explications sur le phénomène expérimenté. [L'élève] doit alors anticiper ce qui va se passer, le vérifier ensuite, et comparer son anticipation à la vérification subséquente. [...] Cette analyse va nous fournir des informations précieuses sur l'interaction de l'élève avec le prototype et nous permettre de réviser celui-ci pour améliorer le dialogue entre l'élève et la situation de laboratoire. »

3.1. LA MISE À L'ESSAI EMPIRIQUE DU PREMIER PROTOTYPE

Cette première mise à l'essai s'est déroulée principalement au cours de la session d'hiver 1994. Durant les entrevues, nous étions particulièrement attentifs au cheminement des étudiants dans leur découverte des modèles explicatifs et aux moments propices où le support théorique devenait nécessaire. Par cette démarche, nous cherchions à atteindre ce que nous estimons être le meilleur équilibre possible entre les apports de la démarche inductive, reliés à la découverte du modèle explicatif, et ceux à caractère déductif, reliés à l'utilisation analytique de ce modèle. Les informations ainsi recueillies devaient nous permettre d'améliorer progressivement, à la fois l'infrastructure du prototype et, sur le plan didactique, la forme et le cadre de présentation des situations expérimentales.

Cependant, pour ce qui est de l'infrastructure, nous avons constaté l'importance d'améliorer la manière de construire les systèmes à l'écran, particulièrement pour ce qui est des raccordements des conduits, des accouplements mécaniques et du branchement des appareils de mesure, mais ces aspects n'ont pas été incorporés dans le premier prototype car ils auraient exigé des changements structuraux trop importants ; aussi, nous avons constaté l'importance de permettre l'observation, de manière contiguë, du comportement du système et des interactions qui se produisent entre les variables au moyen de graphiques qui indiquent l'évolution des variables.

Pour ce qui est des entrevues cliniques, elles nous ont permis de constater la pertinence des orientations fondamentales de notre projet, notamment en ce qui concerne l'intérêt que pouvait susciter un laboratoire virtuel d'expérimentation. Nous avons constaté la surprise, voire l'engouement, des étudiants face à des situations qui se comportaient de manière parfois surprenante à leurs yeux et qu'ils pouvaient expérimenter, modifier et questionner. Nous avons observé la facilité avec laquelle ils élaboraient des situations expérimentales ou en changeaient la configuration. Nous avons aussi observé leurs efforts pour comprendre les comportements inattendus et la motivation que ce type de situations soulevait pour parvenir à les appréhender.

3.2. LA MISE À L'ESSAI EMPIRIQUE DES SITUATIONS D'APPRENTISSAGE

Cette mise à l'essai s'est déroulée principalement au cours de la session d'hiver 1996. Elle a mis à contribution surtout des étudiants du programme régulier, mais aussi un groupe restreint d'étudiants adultes, dans le cadre d'un cours de perfectionnement. Ces derniers exerçaient un emploi directement relié à l'hydraulique et la pneumatique industrielles.

De manière générale, on peut dire que les étudiants réguliers abordaient les expérimentations avec une attitude plutôt décontractée, apparemment sans attentes particulières face aux résultats. Au début ils ne semblaient pas pleinement conscients du fait qu'ils étaient confrontés à des situations expérimentales virtuelles dont le comportement devait s'avérer significativement proche de celui des situations réelles. Ce n'est qu'après un certain temps qu'ils faisaient preuve d'une curiosité manifeste qui les conduisait à interagir réellement avec les situations expérimentales.

Inversement, hors mis les réticences de certains face aux premiers contacts avec l'ordinateur, les étudiants adultes ont adopté une attitude nettement plus active dès le départ. Ils ont abondamment expérimenté, questionné et modifié les situations présentées, exploré des hypothèses de fonctionnement, confronté entre eux le pourquoi de tel ou tel comportement, fait le lien avec des situations concrètes dans leur milieu de travail, etc. L'engouement était évident, à tel point que les activités sur l'ordinateur ont pris une place telle que le temps prévu pour réaliser des expérimentations sur des bancs d'essais réels était fortement réduit. La question a donc été soulevée quant à la pertinence, pour eux, de réaliser des expérimentations sur bancs d'essais. Curieusement, la réponse a été unanime et incontournable ; elle s'est exprimée par des propos tels : *«Nous passons la journée à travailler dans des systèmes hydrauliques sans toujours comprendre ce que nous faisons. Les simulations nous donnent accès à cette compréhension...»*, *«On peut essayer plusieurs solutions en quelques secondes sans qu'il en coûte rien en matériel et les implanter seulement lorsqu'elles sont bonnes»*, *«La simulation nous met à la portée de la main une réserve illimitée et gratuite de composants»*, *«Si l'on fait des erreurs, ça ne coûte rien et, ici, ce n'est pas dangereux»*.

Pour ce qui est des situations d'apprentissage proprement dites, dès leur création, la plupart d'entre elles présentaient une configuration expérimentale conforme à celle qui est présentée à l'annexe III. Cependant, la descriptions des observations et du contexte expérimental a évolué au fil des essais. Notons que ces situations d'apprentissage, tout en restant simples quant au nombre d'éléments, couvrent un éventail de concepts et de phénomènes assez large. D'autres situations, plus complexes du point de vue disciplinaire et présentant des aspects reliés spécifiquement aux applications technologiques de l'hydraulique et de la pneumatique, font aussi partie de la banque qui est proposée aux étudiants.

Bien entendu, le comportement de ces situations d'apprentissage est à la fois représentatif de celui des situations réelles et conforme au comportement décrit dans l'algorithme du cadre théorique du chapitre précédent. Particulièrement la situation «Exper 7. Lois de l'écoulement des liquides et des gaz» a été conçue explicitement afin que les étudiant puissent expérimenter et valider les principaux aspects de ce cadre.

Dans un tout autre ordre d'idées, nous avons aussi été confrontés à ce qui pourrait s'avérer être une limite importante de l'apprentissage au moyen de simulations, soit l'attitude d'incrédulité de certains étudiants confrontés au comportement d'une situation qui fait appel à un phénomène à propos duquel ils entretiennent une fausse représentation. Cette incrédulité s'est exprimée par des propos tels «*dans la simulation, c'est ça, mais dans la réalité, ça m'étonnerait*». En d'autres mots, le modèle qui sous-tend le comportement du simulateur n'est pas pris d'emblée comme étant crédible. Bien entendu, à priori, cette attitude est saine du point de vue intellectuel ; elle illustre cependant l'aspect coriace des fausses représentations et l'importance de pouvoir les confronter, au moyen d'expérimentations multiples, congruentes et diversifiées, à la preuve incontournable de la réalité –fut-elle simulée–.

Hors mis la réserve précédente, et contrairement à nos prévisions, nous devons admettre que, particulièrement la deuxième mise à l'essai empirique avec les étudiants n'a pas donné lieu à autant d'ajustements que dans le cas des mises à l'essai fonctionnelles. Cette situation serait due, selon nous, d'une part, au fait que les premières mises à l'essai fonctionnelles ont été faites avec la contribution de professeurs de la discipline ; ils ont donc apporté leurs commentaires à la fois au plan technologique et pédagogique, ce qui nous aurait permis d'anticiper la réaction des étudiants et, par le fait même, de réduire les ajustements lors de la mise à l'essai empirique. D'autre part, cette situation serait aussi en partie attribuable au fait que le comportement de Hydro+Pneu[©] soit suffisamment complexe et complet, de sorte que les étudiants ne le questionnent pas, sauf évidemment lorsque les résultats entrent en conflit direct avec leurs représentations conceptuelles.

Ceci nous porterait à penser que les situations expérimentales d'apprentissage élaborées et administrées au moyen de Hydro+Pneu[©] permettent bel et bien de placer l'étudiant en situation de conflit conceptuel, mais, en même temps, ça soulève aussi la question de la portée des apprentissages qu'ils peuvent faire de manière autonome : tout semble se passer comme si, lorsque les expérimentations s'avèrent conformes aux comportements attendus, on n'apprend rien de significativement nouveau et, dans les cas contraires, on remet en question la crédibilité de ces comportements. Dans un tel contexte, l'étudiant aura-t-il l'attitude, le réflexe et la volonté de vraiment approfondir ses expérimentations ? Acceptera-t-il de remettre en question ses conceptions ? L'environnement d'apprentissage qui leur est proposé réussira-t-il à les interpeller et à les motiver suffisamment pour qu'ils explorent et expérimentent abondamment les situations ?

Voilà des questions fondamentales que seule une expérimentation élargie et systématique permettrait d'élucider.

CHAPITRE IX
CONCLUSOIN GÉNÉRALE

CONCLUSOIN GÉNÉRALE

Dans le cadre de la recherche qui est au centre de cette thèse, nous avons conceptualisé un environnement d'expérimentation en simulation assistée par ordinateur, incluant un cadre théorique, dans le but d'améliorer l'apprentissage des concepts reliés aux phénomènes qui se produisent dans les systèmes technologiques fermés, plus particulièrement les systèmes hydrauliques et pneumatiques industriels. Ces phénomènes ne sont pas directement observables et leur évolution obéit aux interactions complexes qui se produisent à l'intérieur de ces systèmes, d'où leur caractère particulièrement abstrait qui les rend difficiles à apprendre.

Notre démarche à consisté à concevoir cet environnement d'apprentissage à partir d'une situation problématique qui se caractérise notamment par la persistance de nombreuses fausses représentations conceptuelles chez un bon nombre d'étudiants qui ont déjà complété leur formation dans le domaine, et par la complexité des phénomènes impliqués dans les systèmes en question, de sorte qu'ils ne parviennent pas à résoudre des situations simples qui font appel à une compréhension qualitative de ces phénomènes.

Dans le but d'améliorer cette situation, nous avons réalisé un premier prototype de cet environnement d'apprentissage interactif d'inspiration essentiellement constructiviste, basé sur l'expérimentation et la modélisation didactique. Par la suite, à titre de co-auteur didactique et disciplinaire, nous avons contribué à la réalisation d'un logiciel de simulation avancée de systèmes hydrauliques et pneumatiques, commercialisé sous le nom de Hydro+Pneu[©]. Ce logiciel rejoint l'essentiel des orientations didactiques que nous poursuivions dans le cadre de cette recherche. À partir de Hydro+Pneu[©], nous avons développé des situations expérimentales d'apprentissage qui, conjointement avec le logiciel, constituent un environ-

nement qui place l'étudiant dans une situation dynamique de résolution de problèmes et qui l'incite à faire des expérimentations, à se questionner et à explorer des hypothèses. Par cette démarche, il est amené à construire ses connaissances et, le cas échéant, à revoir ses conceptions face aux résultats obtenus avec le simulateur.

Par ailleurs, nous avons élaboré un cadre théorique pour l'apprentissage de l'énergie des fluides, de nature semblable à celui qui existe pour les circuits électriques. Ce cadre théorique permet, au plan didactique, d'explicitier les règles qui sous-tendent la manière dont les fluides se distribuent dans les circuits et d'articuler une analyse cohérente du comportement des systèmes.

Nous avons réalisé ces démarches selon l'optique du modèle de recherche-développement technologique en éducation de Nonnon, et effectué des mises à l'essai fonctionnelles et empiriques. Les résultats de ces mises à l'essai indiquent que cet environnement d'apprentissage rend compte du comportement des systèmes selon un degré de fidélité technologique suffisamment proche et significatif de celui des systèmes réels, en plus d'offrir les avantages inhérentes à la simulation assistée par ordinateur, c'est-à-dire la possibilité de créer facilement des situations et de les expérimenter, d'illustrer les phénomènes non observables, de faire varier les paramètres, d'observer simultanément et en temps réel le comportement des systèmes et l'évolution des variables au moyen de graphiques, etc.

Par ailleurs, les caractéristiques technologiques propres à Hydro+Pneu[®] confèrent à cet environnement d'apprentissage des capacités reliées à la conception de systèmes et au diagnostic de pannes dans un contexte industriel. Cet aspect, que nous n'avons pas pour-

suiwi spécifiquement au plan didactique, constitue, selon nous, un sérieux indice quant à sa valeur didactique en tant que milieu d'étude représentatif des systèmes réels.

Avec ce travail de recherche, nous estimons avoir contribué de deux manières à l'avancement de la didactique des technologies. La première, en conceptualisant et en rendant opérationnel un environnement d'apprentissage en simulation assistée par ordinateur qui constitue un véritable laboratoire virtuel d'expérimentation et qui permet aux étudiants de construire des systèmes complets, de les paramétrer et de les expérimenter de manière interactive et conviviale, d'explorer des hypothèses, etc. La deuxième, en proposant un cadre théorique qui permet de rendre intelligibles les règles qui sous-tendent la manière dont se distribuent les fluides dans les systèmes, et qui permet d'articuler une analyse complète de leur fonctionnement ; outre les aspects théoriques, ce cadre comporte un algorithme qui permet de le rendre opérationnel dans un contexte d'enseignement. Inversement, les fonctionnalités propres du logiciel Hydro+Pneu[©] nous ont permis de valider ce modèle algorithmique. Nous pensons que ce modèle devrait s'avérer utile pour l'enseignement, en ce sens qu'il constitue un moyen opérationnel permettant de vérifier la valeur de la contribution théorique de ce cadre et, par le fait même, de le valider ou de le réfuter.

Pour ce qui est des résultats des mises à l'essai fonctionnelles, ils montrent que, effectivement, les comportements générés par le logiciel sont conformes et significatifs de ceux des systèmes réels, ce qui constitue un sérieux indice de sa validité fonctionnelle.

Les résultats qualitatifs des mises à l'essai empiriques réalisées avec des étudiants montrent l'intérêt et la facilité avec laquelle ils se placent dans une situation dynamique d'expérimentation et de recherche de solutions face aux situations problématiques qui leur

sont présentées. Cet aspect constitue, en soi, un indice de la valeur didactique de cet environnement d'apprentissage et de sa capacité de placer l'étudiant en situation de conflit conceptuel lorsqu'il fait face à des comportements qui ne sont pas conformes à ses attentes. Cependant, les limites de ces résultats, notamment pour ce qui est du nombre restreint d'étudiants impliqués, nous obligent à la prudence quant à leur validité. C'est pourquoi il serait opportun de vérifier, au moyen d'une mise à l'essai systématique, l'impact réel de cet environnement sur la qualité des apprentissages et sur la compréhension des étudiants sur les concepts et les phénomènes qui se produisent dans les systèmes. Aussi, il serait opportun de voir dans quelle mesure cet environnement permet de prévenir la génération de fausses représentations conceptuelles ou, le cas échéant, de les redresser de manière durable lorsqu'elles sont déjà présentes.

Au terme de cette thèse, il est opportun d'entrevoir les principales orientations qui pourraient faire l'objet de développements futurs et qui pourraient être incluses dans une éventuelle version ultérieure. Ces orientations découlent de l'évolution graduelle de notre idée de développement originale mais qui n'ont pu être prises en compte, soit pour des raisons liées au moment où elles ont été clairement conceptualisées, soit qu'elles exigeaient un volume de travail et des coûts qui auraient largement dépassé le contexte de réalisation d'un prototype.

La première orientation concerne la création d'un tutoriel, avec des capacités de simulation et permettant des enchaînements logiques et l'analyse des réponses des étudiants en termes notamment de validation des configurations expérimentales, c'est-à-dire des réglages des paramètres du système et de sa morphologie (pression d'ouverture d'une valve, cylindrée d'une pompe, présence ou absence d'un composant en un point donné du système, etc.). L'infrastructure de ce tutoriel implique notamment un éditeur de boutons de

dialogue et un éditeur de texte pour permettre aux professeurs de modifier ou d'élaborer les contenus. Cette infrastructure s'est avérée trop longue et coûteuse à réaliser. Nous pensons que le développement d'un tel tutoriel, en tant que module incorporé dans Hydro+Pneu[©], est incontournable si l'on désire proposer aux étudiants un moyen d'apprentissages autonome.

La deuxième orientation concerne le cadre théorique que nous avons développé au chapitre VIII. Ce cadre se base sur le comportement du liquide dans les vases communicants avant d'atteindre la position d'équilibre. Il propose une démarche d'analyse du fonctionnement des systèmes très accessible, basée sur les vases communicants. Il serait intéressant que Hydro+Pneu[©] comporte des moyens pour simuler ces systèmes sous forme de vases communicants. Leur comportement est conforme à celui généré par le simulateur ; seule la présentation est différente.

La troisième orientation à trait à l'élaboration de vues en coupe animées des composants (les plus significatifs). Ces animations devraient rendre compte de l'évolution de la simulation du système et illustrer les phénomènes qui se produisent à l'intérieur du composant (pilotages internes, déplacement des tiroirs, fuites, équilibrages hydrostatiques, etc.). Dans ces conditions, elles seraient d'une grande richesse pédagogique.

En conclusion, dans le cadre des travaux de recherche qui sont au centre de cette thèse, nous avons notamment conceptualisé, au plan didactique, un laboratoire virtuel de simulation qui s'est concrétisé sous la forme d'un logiciel, Hydro+Pneu[©], de simulation avancé de systèmes hydrauliques et pneumatiques. Avec ce logiciel, nous avons élaboré des situations d'apprentissage qui permettent aux étudiants de tester leurs propres connaissances face au comportement des systèmes hydrauliques et pneumatiques. En interagis-

sant avec les variables impliquées, ils peuvent observer le comportement de ces systèmes au moyen d'animations et de graphiques produits au fil des simulations et voir si ce comportement est cohérent avec leurs propres conceptions. Nous avons aussi élaboré un cadre théorique qui, au plan didactique, permet d'explicitier les règles qui sous-tendent le comportement de ces systèmes.

Nous espérons que ces outils didactiques seront bénéfiques pour l'apprentissage de l'énergie des fluides.

BIBLIOGRAPHIE

- Ackermann, W. et Rialan, B. (1963), *Transmission et assimilation de notions scientifiques*. C.E.R.P., Paris.
- Actes (1986), 5^e colloque sur la recherche en formation professionnelle, UQAC, Chicoutimi.
- Actes (1988), 6^e colloque national sur la recherche en formation professionnelle, Université de Sherbrooke, Sherbrooke.
- Actes (1989), *Rencontre scientifique en enseignement professionnel*. Université Laval, Québec.
- Actes (1990), Symposium sur l'intégration de la micro-informatique à la formation technique et professionnelle, session de Québec, Agence de coopération culturelle et technique et École internationale de Bordeaux, Talence, France,.
- Actes (1991), *La didactique des sciences appliquées en enseignement technique et professionnel*. Université de Sherbrooke, Québec.
- Agabra, J. (1986), *Échanges thermiques*, dans *Éclairages sur l'énergie*. ASTER, n° 2, INRP, Paris.
- Astolfi, J.-P. (1992), *L'école pour apprendre*. ESF, Paris.
- Astolfi, J.P. et Develay, M. (1989), *La didactique des sciences*. Que sais-je ?, Paris, PUF
- Ausubel, D. P. (1968), *Educational psychology : A cognitive view*. Holt, Rinehart & Winston, N.Y.
- Bachelard, G. (1938), *La formation de l'esprit scientifique*. Vrin, Paris. Cité par Astolfi (1992).
- Bachelard, G. (1975), *La philosophie du non*. P.U.F., Paris.
- Balacheff, N. (1986), *Cognitive versus situational analysis of problem-solving behaviours*. For the learning of mathematics, 6 (3), 10-12.
- Bigras, P., Cervera, D. et Wong, T. (1997), *Hydro+Pneu ©. Logiciel de simulation avancée de systèmes hydrauliques et pneumatiques*. Montréal.
- Blondin, C., Closset, J.-L. et Lafontaine, D. (1992), *Raisonnements naturels en hydrodynamique*. Revue Française de Pédagogie, No 100, Paris.

- Cervera, D., Métioui, A., Youssef, A.Y. et Bigras, P. (1991), *Les représentations des élèves en hydraulique et l'apprentissage d'un objet technique*. Congrès de l'ACFAS, actes du colloque.
- Cervera, D., Métioui, A., Youssef, A.Y. et Bigras, P. (1991-B-), *Logiciel d'apprentissage et de simulation en hydraulique industrielle*. Colloque sur l'informatique dans l'enseignement des sciences et du génie (IESG'91), actes du colloque, UQTR.
- Cervera, D., Métioui, A. et Gagnon, R. (1992), *Apprentissage par la modélisation en hydraulique industrielle*. Première biennale de l'éducation et de la formation, UNESCO, Paris.
- Cervera, D. et Métioui, A. (1993), *Énergie des fluides : analyse conceptuelle et représentations des élèves*. Rapport de recherche (PAREA), Collège de Valleyfield, Québec.
- Cervera, D. et Nonnon, P. (1993), *Démarche de modélisation en simulation assistée par ordinateur pour l'apprentissage des concepts d'énergie des fluides*. 4^e colloque international sur la robotique pédagogique, actes du colloque, Université de Liège, Belgique.
- Cervera, D., Bigras, P. et Wong, T. (1997), *Laboratoire virtuel d'expérimentation et d'apprentissage de systèmes hydrauliques et pneumatiques : approche de modélisation en simulation assistée par ordinateur*. 9^e colloque de l'Association pour la recherche au collégial (ARC), actes du colloque, Collège Dawson, Montréal.
- Cervera, D., Métioui, A. et Nonnon, P. (en rédaction), *Représentations conceptuelles des étudiants sur l'incompressibilité, le débit et le vide dans les systèmes hydrauliques*.
- Chabal, J., De Preester, R., Sclafer, J. et Ducel, R., (1973), *Méthodologie de la construction mécanique*. Foucher, Paris
- Closset, J.L. (1992), *Raisonnement en électricité et en hydrodynamique*. ASTER N° 14. Raisonner en sciences, INRP, Paris.
- De Kleer, J. (1984), *How circuits work*. Artificial intelligence, n° 24.
- Delacote, G., Tiberghien, A. et Schwartz, J. (1983), Actes du premier atelier international sur la *Recherche en didactique de la physique*. La Londe les Maures, Éditions du C.N.R.S., France.

- De Vecchi, G. (1987), *Utilisation des représentations enfantines en biologie et formation des maîtres*. Aster, No 3.
- De Rosnay, J. (1975), *Le microscope - vers une vision globale*. Seuil, Paris.
- Dupin, J. et Johsua, S. (1989), *Analogies and «modeling analogies» in teaching: Some exemples in basic electricity*. Science education, 72 (2).
- Durand, D. (1979), *La systématique*. P.U.F., Paris.
- Fayet, (1991), *Hydraulique : machines et composants*. Eyroles, Paris.
- Giardina, M. (1992), *L'interactivité dans un environnement d'apprentissage multimédia*. Revue des sciences de l'éducation, vol XVIII, n°1, Québec.
- Giordan, A. et de Vecchi, G. (1987), *Les origines du savoir; des conceptions des apprenants aux concepts scientifiques*. Delachaux & Niestlé S. A., (Suisse), Paris.
- Giordan A., Astolfi, J.-P., Develey, M. et al. (1987), *L'élève et/ou les connaissances scientifiques*. Éditions Peter Lang SA, Berne, 2e édition.
- Giordan, A. (1978), *Observations-expérimentation : mais comment les élèves apprenent-ils ?* Revue française de pédagogie, n° 45, Paris
- Hewson, M.G. et Hewson, P.W. (1983), *Effect of instruction using students'prior knowledge and conceptual change strategies on science learning*. Journal of Research in Science Teaching, 20, 73-743.
- Jonnaert, P. (1988), *Conflits de savoirs et didactique*. De Boeck-Wesmael s.a., Bruxelles.
- Johsua, S. et Dupin, J.-J. (1989), *Représentations et modélisations : le débat scientifique dans la classe et l'approche de la physique*. Peter Lang, Berne.
- Kaes, R. (1968), *Images de la culture chez les ouvriers français*. Cujas.
- Kariotogloy, P., Koumaras, P. et Psillos, D. (1993), *A constructivist approach for teaching fluid phenomena*, Physics Education, N°. 28.
- Kuhn, T. (1970), *La structure des révolutions scientifiques*. Flammarion, Paris.
- Labonté, T. (1986), *L'acquisition des concepts scientifiques sous-jacents à la formation technologique dans l'enseignement professionnel au secondaire*. (2 tomes) DGERU, MESS, Gouvernement du Québec.

- Labonville, R. (1991), *Conception des circuits hydrauliques, une approche énergétique*. Éditions de l'École polytechnique de Montréal.
- Lafontaine, D., Blondin, C. et Closset, J. L. (1990), *Résolution de problèmes d'hydrodynamique face à un circuit concret. Comparaison des stratégies avant et après apprentissage*. European journal of psychology of education, vol V, No 4.
- Laroche, J.-L. (1970), *À propos des théories de l'apprentissage*. Éducation permanente, n°. 8.
- Laroche, D., Brassard, C., Tremblay, C. et Nérrou, J.-P. (1991), *L'approche systémique comme élément intégrateur*. Service du développement des programmes, DGEC, MESS, Gouvernement du Québec.
- Larochelle, M. et Désautels, J. (1992), *Autour de l'idée de science*. Les presses de l'Université Laval, Québec.
- Laszlo, E. (1969), *System, structure and experience - Toward a scientific theory of mind*. Gordon and Breach, Science Publishers, Inc., Paris.
- Lemeignan, G. et Weil-Barais, A. (1993), *Construire des concepts en physique*. Hachette, Paris.
- Le Moigne, J.L.(1977), *La théorie du système général - théorie de la modélisation*. Paris, PUF.
- Leplat, J. (1976), *Analyse du travail et genèse des conduites*. International Review of Applied Psychology. Vol. 25, N° 1.
- Lévy-Leblond, J.-M., (1980), *La physique en questions : mécanique*. Vuibert, Paris.
- Migne, J.-R. (1967), *Étude des représentations de quelques notions de physique*. INFA, France.
- Migne, J.-R. (1976), *La notion de «représentation» en pédagogie des adultes*. POUR. N° 49.
- Mullet, E. (1990), *Distinction between the concepts of weight and mass in high school students*. International Journal of Science Education. Vol. 12, N° 2.
- Moscovici S. (1961), *La psychanalyse, son image et son public*. Paris, P.U.F.

- Moscovici, S., Ackermann, W. et Barbichon, G. (1962). *Diffusion des connaissances scientifiques et techniques*. C.E.R.P., Paris.
- Nonnon, P. (1986), *Laboratoire d'initiation aux sciences assisté par ordinateur*. Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal.
- Nonnon, P. (1987), *Modèle de recherche développement technologique en éducation*. 1^{er} congrès des sciences de l'éducation de langue française du Canada. *Recherche et progrès en éducation : bilan et prospectives*. Université Laval.
- Nonnon, P. (1988), *La lunette cognitive*. Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal.
- Novak, J.D. (1987), Proceedings of the second international seminar on «*Misconceptions and educational strategies in science and mathematics*». Cornell University, Ithaca, N.Y.
- Osborne, R.J. (1980), *Force. Learning in Science. Project*. Working paper no 16, University of Waikato, Hamilton.
- Peterfalvi, B. (Dir), Astolfi, J.-P. et Vérin, A. (1992), *Objectifs-obstacles et situations d'apprentissage autour du concept de transformation de matière*. Document interne, INRP, Paris.
- Piaget, J. (1964), *Six études de psychologie*. Gonthier, Genève.
- Pippinger, J. et Koff, R. (1959), *Fluid-power controls*. McGraw-Hill New Yourk.
- Posner, G.J., Strike, K.A., Hewson, P.W. et Gertzog, W.A. (1982), *Accommodation of a scientific conception : towards a theory of conceptual change*. Science Education, 66 (2), 211-227.
- Remy, F. (1982), *L'énerdie des fluides*. (2 tomes). Editions Julienne, Québec.
- Rexroth, (1981), *Le cours d'hydraulique : principes de base et composants de la technique des fluides—Hydraulique*. (vol. 1). Ouvr. collectif, Mannesmann Rexroth GmbH, Lohr am Main, Allemagne.
- Rumelhard, G. (1986), *La génétique et ses représentations dans l'enseignement*. Peter Lang, Berne.

- Schwab, J.J. (1962), *The concept of the structure of a discipline*. The Educational Record, 43, 197-205.
- Stewart, H. (1963), *Hydraulic and pneumatic power for production*. Industrial Press, New York.
- Thibergien, A. et Delacote, G. (1976), *Manipulations et représentations de circuits électriques simples par des enfants de 7 à 12 ans*. Revue française de pédagogie, n° 34.
- Viard, J. (1991), *Essai d'élaboration d'une stratégie didactique*. «Petit x» n° 25, Paris.
- Viennot, L. (1978), *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*. Revue française de pédagogie. No 45, Paris.
- Viennot, L. (1989), *Obstacle épistémologique et raisonnements en physique: tendance au contournement des conflits chez les enseignants*. Dans Bernarz, N. et Garnier, C. *Constructions des savoirs : Obstacles et conflits*. CIRADE-UQUAM, Montréal.
- Walliser, B. (1977), *Systèmes et modèles*. Seuil, Paris.
- Watts, D.M. (1983), *A study of school childrens' alternative frameworks of the concept of force*. European Journal of Science Education. N° 5 (2).
- White, B. et Frederiksen, J. (1990), *Causal model progression as a foundation for intelligent learning environments*. Artificial intelligence, n° 42, 99-157.
- Wolansky, D., Nagohosian, J. et Henke, R. (1977), *Fundamentals of fluid power*. Houghton Mifflin Co., Boston.
- Youssef, A.Y., Métioui, A., Bigras, P. et Cervera, D. (1991), *Les représentations des étudiants du collégial professionnel à l'égard des principes de fonctionnement des circuits hydrauliques*. École de technologie supérieure et Collège de Valleyfield. Rapport de recherche interne.

ANNEXE I

NATURE DES TÂCHES GÉNÉRALEMENT DÉVOLUES AUX TECHNICIENS DE L'ORDRE COLLÉGIAL

NATURE DES TÂCHES GÉNÉRALEMENT DÉVOLUES AUX TECHNICIENS DE L'ORDRE COLLÉGIAL

L'analyse qui suit est tirée de Cervera et al. (1993). Elle présente la nature des tâches que les techniciens de l'ordre collégial doivent généralement effectuer dans le domaine de l'énergie des fluides. Nous y ajoutons une description succincte des apports attendus de l'environnement d'apprentissage informatisé qui fait l'objet de cette thèse, ainsi qu'une relation des principaux phénomènes, fonctions et concepts impliqués dont il convient que cet environnement rende compte.

1. CONCEPTION, MODIFICATION ET ADAPTATION DE SYSTÈMES

Il s'agit de tâches reliées à la conception, à la modification et à l'adaptation de systèmes d'énergie des fluides pour des applications courantes, mais pouvant présenter un certain degré de complexité, c'est-à-dire des tâches conduisant à l'élaboration de solutions cohérentes et fonctionnelles à des problèmes techniques pour lesquels la contribution soutenue d'un spécialiste du domaine n'est pas normalement requise. Ces tâches comportent les principaux éléments suivants :

1.1. Déterminer les paramètres et les conditions de fonctionnement du système

À cet égard, l'environnement d'apprentissage permettra d'élaborer et d'expérimenter des circuits en interaction avec les équipements mécaniques, ce qui permettra d'explorer, d'élaborer et de vérifier les hypothèses préliminaires de fonctionnement. Les principaux phénomènes, concepts ou fonctions que l'on pourra considérer sont : le cycle de travail, l'amplitude des mouvements, la vitesse, le débit, la force, l'effet des charges menantes, les sources d'énergie, la puissance impliquée et les températures extrêmes de fonctionnement.

1.2. Concevoir le circuit du système et en élaborer le diagramme

À cet égard, l'environnement d'apprentissage permettra d'élaborer et d'expérimenter les conditions de fonctionnement du système en interaction avec les équipements mécaniques, ainsi que de déterminer les fonctions technologiques du cycle de travail et d'élaborer le diagramme du système complet. Il permettra aussi de déterminer la technologie (hydraulique ou pneumatique) la mieux adaptée et de faire une évaluation comparée entre plusieurs solutions possibles. Les principaux phénomènes, concepts ou fonctions que l'on pourra considérer sont : les conditions logiques de fonctionnement, la séquence des mouvements, le balancement et l'équilibrage des charges, la régulation du débit, la limitation et la réduction de pression, les verrouillages de sécurité, la régénération de débit, l'accumulation d'énergie, les protections contre les emballements, le rendement énergétique et l'équilibre thermique.

1.3. Déterminer les caractéristiques et les spécifications des composants du système

À cet égard, l'environnement d'apprentissage permettra de déterminer les caractéristiques et les spécifications théoriques des composants, d'expérimenter le comportement de composants ayant des spécifications proches de celles des composants du marché, puis de déterminer ceux qui offrent la solution optimale. Les principaux phénomènes, concepts ou fonctions que le logiciel permettra de considérer sont :

- 1) Pour les pompes et les moteurs : la cylindrée, la vitesse d'entraînement, la pression maximale, la puissance impliquée et les courbes de rendement.
- 2) Pour les régulateurs de débit : le débit nominal, le degré de précision et les effets des variations de pression et des compensateurs.

- 3) Pour les distributeurs : le nombre de voies et de positions, les organes de commande et le débit nominal.
- 4) Pour les vérins : les diamètres du piston et de la tige, la course, les frottements visqueux et mécaniques causés par les joints d'étanchéité et les fuites internes.
- 5) Pour les accumulateurs : la pression maximale et celle du gaz de précharge, le volume de liquide accumulé, le type de construction et le type de compression.
- 6) Pour les filtres : la précision de filtrage, la résistance à l'écoulement selon le débit et le degré de colmatage et la pression de dérivation.
- 7) Pour les réservoirs : le volume, la surface et le taux de dissipation de chaleur et l'évolution de la courbe d'équilibre thermique.
- 8) Pour les échangeurs de chaleur : la puissance impliquée.
- 9) Pour les compresseurs : le volume total, le débit nominal, le rendement volumétrique , ainsi que les pressions et la fréquence de commutation.

1.4. Élaborer les plans et devis d'implantation et de fonctionnement du système

À cet égard, l'environnement d'apprentissage permettra de déterminer les principales spécifications de fonctionnement du système et de produire le schéma du circuit. Les principaux phénomènes, concepts ou fonctions que le logiciel permettra de considérer sont les mêmes que ceux reliés aux tâches 1.2. et 1.3.

2. MONTAGE, RÉGLAGE ET MISE AU POINT DE SYSTÈMES

Il s'agit de tâches reliées à l'implantation et à la mise au point de systèmes, à partir de plans et devis, c'est-à-dire qu'il s'agit de procéder au montage des composants et des con-

duits, et d'effectuer les réglages de fonctionnement. Ces tâches comportent les principaux éléments suivants :

2.1. Assembler les divers composants d'un système

À cet égard, l'environnement d'apprentissage permettra, dans une certaine mesure, de prévoir et de se familiariser avec les divers types de conduits et raccords qu'il faudra effectuer dans le système réel. Il permettra aussi d'expérimenter l'effet de branchements de conduits ou raccords erronés ou manquants sur le fonctionnement des composants. Les principaux phénomènes, concepts ou fonctions que le logiciel permettra de considérer sont : l'effet du colmatage de filtres et des conduits de pilotage et l'effet de l'absence de conduits de drainage.

2.2. Effectuer les opérations, réglages et mises au point selon les spécifications

À cet égard, l'environnement d'apprentissage permettra de pratiquer et d'expérimenter les diverses procédures de réglage et de mise au point des systèmes en interaction avec les équipements mécaniques et les charges. Il permettra aussi de constater l'interdépendance des divers réglages sur le comportement du système et de déterminer la séquence optimale pour les faire. Les principaux phénomènes, concepts ou fonctions que le logiciel permettra de considérer sont tous ceux reliés à l'ensemble des tâches précédentes.

3. ENTRETIEN ET RÉPARATION DE SYSTÈMES

Il s'agit de tâches visant à diagnostiquer et à remédier aux troubles de fonctionnement des systèmes et à en assurer le bon fonctionnement, notamment par des mesures d'entretien préventif. Ces tâches comportent les principaux éléments suivants :

3.1. Déceler les troubles de fonctionnement ;

À cet égard, l'environnement d'apprentissage permettra de caractériser les troubles de fonctionnement et d'identifier la nature et la source du problème. Les principaux phénomènes, concepts ou fonctions qu'il permettra de considérer sont : les surcharges ; l'effet de l'usure des composants sur les fuites internes et la génération de chaleur et les températures excessives qui en découlent ; les effets des pressions, débits ou forces inadéquates ; l'irrégularité des mouvements et l'altération du cycle de travail.

3.2. Diagnostiquer les causes de mauvais fonctionnement

À cet égard, l'environnement d'apprentissage permettra d'identifier le composant présumé défectueux, ainsi que d'effectuer les tests, mesures et ajustements permettant cerner la nature du problème. Les principaux phénomènes, concepts ou fonctions que le logiciel permettra de considérer sont ceux reliées à l'ensemble des tâches précédentes. De manière générale, il permettra d'étudier des systèmes impliquant des composants dont le comportement est anormal. Il permettra aussi de comparer les courbes caractéristiques des bons composants avec celles des défectueux.

3.3. Réparer et reconditionner les composants

À ce stade, il n'est prévu aucune contribution particulière ou significative de l'environnement d'apprentissage à cet égard.

3.4. Vérifier les performances du système en regard des spécifications

À cet égard, l'environnement d'apprentissage permettra de vérifier les performances du système tout en observant son comportement, ainsi que d'effectuer les tests, mesures, vérifications et ajustements nécessaires. Les principaux phénomènes,

concepts ou fonctions qu'il permettra de considérer sont ceux reliés à l'ensemble des tâches précédentes.

3.5. Assurer l'entretien préventif du système

À ce stade, il n'est prévu aucune contribution particulière ou significative de l'environnement d'apprentissage à cet égard.

ANNEXE II

**DOCUMENT PRÉPARATOIRE À LA RENCONTRE D'ÉVALUATION
DES ORIENTATIONS DU LOGICIEL HYDRO-PNEU**

DOCUMENT PRÉPARATOIRE À LA RENCONTRE D'ÉVALUATION DES ORIENTATIONS DU LOGICIEL HYDRO-PNEU

BUT DU DOCUMENT

Le but de ce document est de présenter de manière succincte les grandes orientations didactiques et technologiques qui sous-tendent le logiciel **HYDRO-PNEU** que l'on s'apprête à développer. La lecture de ce document préparatoire devrait permettre aux participants à la rencontre d'amorcer une réflexion sur l'intérêt pédagogique que peut présenter un tel logiciel, sur les aspects essentiels qu'il devrait comporter, sur les carences ressenties avec d'autres produits existants, les aspects à éviter... Bref, il s'agit de faire en sorte que **HYDRO-PNEU** réponde le mieux possible aux réalités et aux besoins de l'enseignement des cours reliés à l'énergie des fluides au collégial.

Le document présente une description sommaire du logiciel, ses orientations pédagogiques, ses composants, ses fonctions technologiques, ainsi que des exemples de pages-écrans proposées, des sous-menus, etc. À la fin, vous y trouverez un résumé des principales orientations, phénomènes et concepts que l'on se propose de considérer. Notre rencontre vise à clarifier dans quelle mesure ils sont essentiels, importants, utiles ou suffisants, et si la forme de traitement envisagée est la plus convenable.

NATURE DU LOGICIEL HYDRO-PNEU

La vocation première du logiciel est l'aide à l'enseignement et à l'apprentissage des systèmes hydrauliques et pneumatiques industriels de puissance. L'objectif didactique poursuivi est de rendre compte des phénomènes physiques qui se produisent dans ces systèmes, afin d'en supporter l'apprentissage.

Nous visons à placer l'étudiant dans une situation dynamique de résolution de problèmes qui l'incitera à interagir avec les systèmes, à se poser des questions, à les expérimenter et à formuler des réponses en regard de modèles explicatifs interactifs qui illustreront les relations entre les variables. Le logiciel fera abondamment appel à l'expérimentation en simulation et favorisera les apprentissages autonomes ainsi que le redressement des fausses représentations conceptuelles des étudiants ¹.

BUT DU LOGICIEL

Le but du logiciel est de créer un environnement informatisé d'apprentissage permettant de rendre observables et intelligibles les phénomènes qui se produisent dans les systèmes, afin de favoriser l'apprentissage de ces phénomènes et des concepts qui les sous-tendent, au niveau qualitatif et quantitatif. Cet environnement constituera un milieu d'expérimentation, une sorte de laboratoire virtuel, avec lequel l'étudiant pourra observer le fonctionnement des systèmes hydrauliques et pneumatiques complets, c'est-à-dire des systèmes en interaction avec des mécanismes usuels sur lesquels agiront diverses charges. Il comprendra aussi un ensemble d'activités dirigées qui permettront à l'étudiant de réaliser des apprentissages de manière autonome. L'étudiant disposera de textes de théorie accompagnés de systèmes hydrauliques ou pneumatiques déjà construits avec lesquels il devra effectuer les expérimentations

¹On trouvera dans *Énergie des fluides : analyse conceptuelle et représentations des élèves*, (Cervera et Métioui, 1993), une description des principales difficultés d'apprentissage ainsi que la caractérisation des fausses représentations conceptuelles qu'entretiennent les étudiants du collégial dans le domaine de l'énergie des fluides. Il ressort de ce rapport de recherche que les étudiants ont des difficultés majeures, particulièrement au sujet des concepts d'incompressibilité, de pression, de débit, de vide et d'énergie. Plusieurs de ces représentations reposent sur des fondements qui sont à la fois communs, erronés et contradictoires, c'est-à-dire la conception selon laquelle les liquides, tout comme les gaz, seraient hautement compressibles. Il en découle, entre autres, que les étudiants n'appliquent pas le principe de la continuité du débit ou de la matière lorsqu'ils analysent le comportement d'un système.

prescrites. Finalement, l'étudiant pourra réaliser des apprentissages d'application et d'enrichissement au moyen de problèmes de laboratoire à résoudre qui feront intervenir des systèmes déjà construits, ou qu'il devra élaborer ou modifier, et qu'il pourra simuler pour expérimenter et vérifier ses réponses.

Le logiciel s'adresse, pour l'essentiel, à une clientèle de niveau professionnel et technique. En d'autres termes, on s'intéresse en priorité à l'ensemble des connaissances, phénomènes et concepts qui sont mis à contribution lors d'interventions de nature technique, c'est-à-dire en relation avec les tâches généralement dévolues aux techniciens de l'ordre collégial, ce qui implique :

- la conception, la modification et l'adaptation de systèmes d'énergie des fluides,
- le montage, l'implantation, le réglage et la mise au point de systèmes,
- la maintenance, l'entretien, le dépannage et la réparation de systèmes.

En relation avec les tâches reliées à la conception, la modification et l'adaptation de systèmes, le logiciel permettra de construire et d'expérimenter des circuits en interaction avec les équipements mécaniques, afin d'élaborer et de vérifier les hypothèses préliminaires de fonctionnement. Ceci comprend notamment : le cycle de travail, l'amplitude des mouvements, la vitesse, le débit, la force, le frottement, l'accélération, l'effet des charges menantes, la cavitation, l'amortissement, les sources d'énergie, le rendement énergétique, la puissance et les températures limites de fonctionnement. Il permettra aussi de déterminer les caractéristiques et les spécifications théoriques des composants, d'expérimenter le comportement de composants ayant des spécifications semblables à celles des composants du marché, puis de déterminer ceux qui offrent la solution optimale.

En relation avec les tâches reliées au montage, l'implantation, le réglage et la mise au point de systèmes, le logiciel permettra de pratiquer et d'expérimenter les di-

verses procédures de réglage et de mise au point des systèmes en interaction avec les équipements mécaniques et les charges.

En relation avec les tâches reliées à la maintenance, l'entretien, le dépannage et la réparation de systèmes, le logiciel permettra de caractériser les troubles de fonctionnement et d'identifier la nature et la source du problème et d'identifier le composant présumé défectueux. Il permettra aussi d'effectuer les tests, mesures et ajustements visant à cerner la nature du problème, de vérifier les performances du système tout en observant son comportement, ainsi que d'effectuer les tests, mesures, vérifications et ajustements nécessaires. À cette fin, le logiciel comportera des composants «altérés» dont les symboles seront identiques aux conventionnels mais dont le fonctionnement simulera une défectuosité telle que le bris ou l'affaiblissement d'un ressort ; le colmatage ou la mauvaise connexion d'un passage de pilotage ou de drainage ; le grippage d'un tiroir ; des fuites internes importantes ; le bris de joints d'étanchéité, etc. Bref, ces composants réagiront d'une manière «incorrecte» et permettront de simuler les pannes et disfonctions courantes que l'étudiant devra diagnostiquer.

LES FONCTIONS GÉNÉRALES DU LOGICIEL

Pour opérationnaliser l'environnement d'apprentissage décrit précédemment, le logiciel comportera trois volets : un simulateur, un tutoriel et une banque de problèmes de laboratoire.

LE SIMULATEUR

Le but du simulateur est de créer un environnement informatisé d'expérimentation avec lequel l'étudiant pourra observer le fonctionnement des systèmes hydrauliques et pneumatiques complets, c'est-à-dire des systèmes en interaction avec des mécanismes usuels, sur lesquels agiront diverses charges. L'étudiant pourra construire le sys-

tème à partir des composants disponibles dans un menu, régler l'ensemble des paramètres, puis observer, en temps réel, son comportement, c'est-à-dire le mouvement des vérins, pompes et moteurs, le remplissage d'un accumulateur, le mouvement des mécanismes et des charges, l'état ouvert ou fermé des valves, les valeurs enregistrées par les appareils de mesure tels manomètre, débitmètre et thermomètre, ou encore, l'évolution et l'interaction les variables au moyen de graphiques. L'étudiant pourra choisir d'effectuer les simulations avec des composants «idéaux» ou «réels». Nous entendons par composant idéal (ou théorique) un composant imaginaire qui répond exactement au rôle défini pour lui, c'est-à-dire dont le fonctionnement ferait abstraction des effets parasites tels : frottement, viscosité, masse, inertie, saturation, non linéarité ; en somme, le composant qui répond au modèle explicatif de premier niveau. Par opposition, le composant «réel» est celui qui tient compte de ces effets parasites, lesquels s'expriment notamment au moyen de courbes caractéristiques empiriques.

LE TUTORIEL

Le but du tutoriel est de créer un ensemble d'activités dirigées visant, d'une part, à permettre à l'étudiant de réaliser des apprentissages de manière autonome et, d'autre part, à dépister et à redresser ses fausses représentations conceptuelles. Dans les deux cas, il disposera de textes de théorie accompagnés de systèmes hydrauliques ou pneumatiques déjà construits, avec lesquels il devra effectuer les expérimentations prescrites. Les réponses de l'étudiant donneront lieu à des enchaînements logiques et aux aiguillages pertinents. Le contenu des leçons pourra être élaboré par l'auteur ou par l'utilisateur. À cet effet, on disposera de deux interfaces distincts, l'un pour l'utilisateur, protégé par un mot de passe, et l'autre pour l'étudiant. Le premier comportera un éditeur de leçons, c'est-à-dire un éditeur de textes et un éditeur graphique simples, ainsi qu'un éditeur de boîtes et de boutons de dialogue au moyen des-

quels l'étudiant donnera ses réponses. Les leçons comporteront des textes théoriques et des dessins, accompagnés de systèmes (circuits) à simuler, que l'étudiant pourra modifier et paramétrer à volonté comme il le ferait avec le simulateur.

Les réponses de l'étudiant prendront l'une ou l'autre des formes suivantes :

- 1- Un ou plusieurs choix de réponses.
- 2- Des valeurs numériques comprises entre deux limites acceptables.
- 3- La validation de la configuration d'un circuit. Dans ce cas, la réponse sera composée des valeurs numériques données à certains paramètres choisis qui caractérisent la situation, tels la valeur d'une charge, d'une pression, ou encore la présence ou l'absence d'un composant ou d'un conduit, l'orientation d'un composant, etc.

L'étudiant pourra accéder et quitter le tutoriel à divers points (ou chapitres). Aussi, il pourra interrompre en tout temps son cheminement dans le tutoriel et accéder au simulateur, puis réintégrer le tutoriel au point où il l'avait quitté.

LA BANQUE DE PROBLÈMES DE LABORATOIRE

Le but de cette banque est d'offrir à l'étudiant un ensemble de situations lui permettant de réaliser des apprentissages d'application et d'enrichissement au moyen de problèmes de laboratoire à résoudre. Les problèmes feront intervenir des systèmes hydrauliques ou pneumatiques déjà construits, ou que l'étudiant devra élaborer ou modifier, et qu'il pourra simuler pour expérimenter et vérifier ses réponses. Contrairement au tutoriel, les problèmes de laboratoire ne comporteront pas de textes théoriques ni d'enchaînements logiques mais seulement du texte et des dessins définissant le problème, avec le circuit du système. À l'instar du tutoriel, le contenu de la banque de problèmes n'a pas à être programmé. Il utilisera le même éditeur de leçons.

LES FONCTIONS DE REPRÉSENTATION DU SIMULATEUR

On entend par fonctions de représentation ce dont le simulateur doit rendre compte en termes d'illustration à l'écran ou, en d'autres mots, ce que l'utilisateur pourra observer pendant le déroulement des simulations. Ces fonctions concernent la représentation des conditions suivantes :

1- Les états en régime stable des systèmes hydrauliques et pneumatiques sous l'effet de forces constantes, c'est-à-dire :

- L'espace d'évolution position / vitesse relatif aux mouvements des vérins, des charges et des mécanismes.
- L'espace d'évolution volume / pression relatif au remplissage des accumulateurs.
- La représentation du sens de rotation des pompes, des compresseurs et des moteurs volumétriques, sommairement en rapport avec la vitesse de rotation.
- La représentation du symbole en position ouverte ou fermée des distributeurs et des valves de pression.

NOTE : Ces états sont représentés par le prototype actuel, à l'exception des mécanismes.

2- Les états en régime transitoire des systèmes hydrauliques et pneumatiques, c'est-à-dire l'espace d'évolution position / vitesse décrit ci-haut, pour les mêmes composants, sous l'effet de forces qui résultent de l'inertie des masses en accélération, notamment lors des départs et arrêts, ainsi que les accélérations sous l'effet de charges menantes qui causent le vide dans le système.

NOTE : Seulement le dernier aspect de ces états est représenté par le prototype actuel.

3- Les états semi-stables des vérins pneumatiques et des charges et mécanismes associés, c'est-à-dire l'espace d'évolution position / vitesse, en tenant compte de la compressibilité de l'air (selon la loi des gaz : $P_1 V_1 = P_2 V_2$) et des forces différentes qui résultent des coefficients de frottement statique et dynamique. Ces états se produisent lorsque les vérins se déplacent à faible vitesse et ils sont caractérisés par un mouvement saccadé, soit l'alternance arrêt-mouvement. L'intérêt de ce phénomène se situe essentiellement au niveau qualitatif. Il convient donc de l'illustrer seulement lorsqu'il sera perceptible à l'écran, soit lorsque sa fréquence sera supérieure à environ 0,3 secondes.

NOTE : Ces états ne sont pas traités par le prototype actuel.

- 4- La représentation, au moyen de vues en coupe ou de perspectives animées, du principe de fonctionnement interne des composants. Ces dessins seront adaptés à partir d'illustrations de catalogues de manufacturiers. L'utilisateur pourra définir la vitesse de déroulement de l'animation et l'amplitude des mouvements impliqués. Il pourra aussi ajouter des appareils de mesure. Dans ce cas, les valeurs affichées par les appareils seront celles de la simulation en cours.

NOTE : Cet aspect n'est pas traité par le prototype actuel. Aussi, il nous paraît moins central que les trois premiers. Par ailleurs, il implique surtout des travaux d'infographie qui peuvent se réaliser indépendamment de ceux du simulateur. Il pourra faire l'objet d'un développement ultérieur.

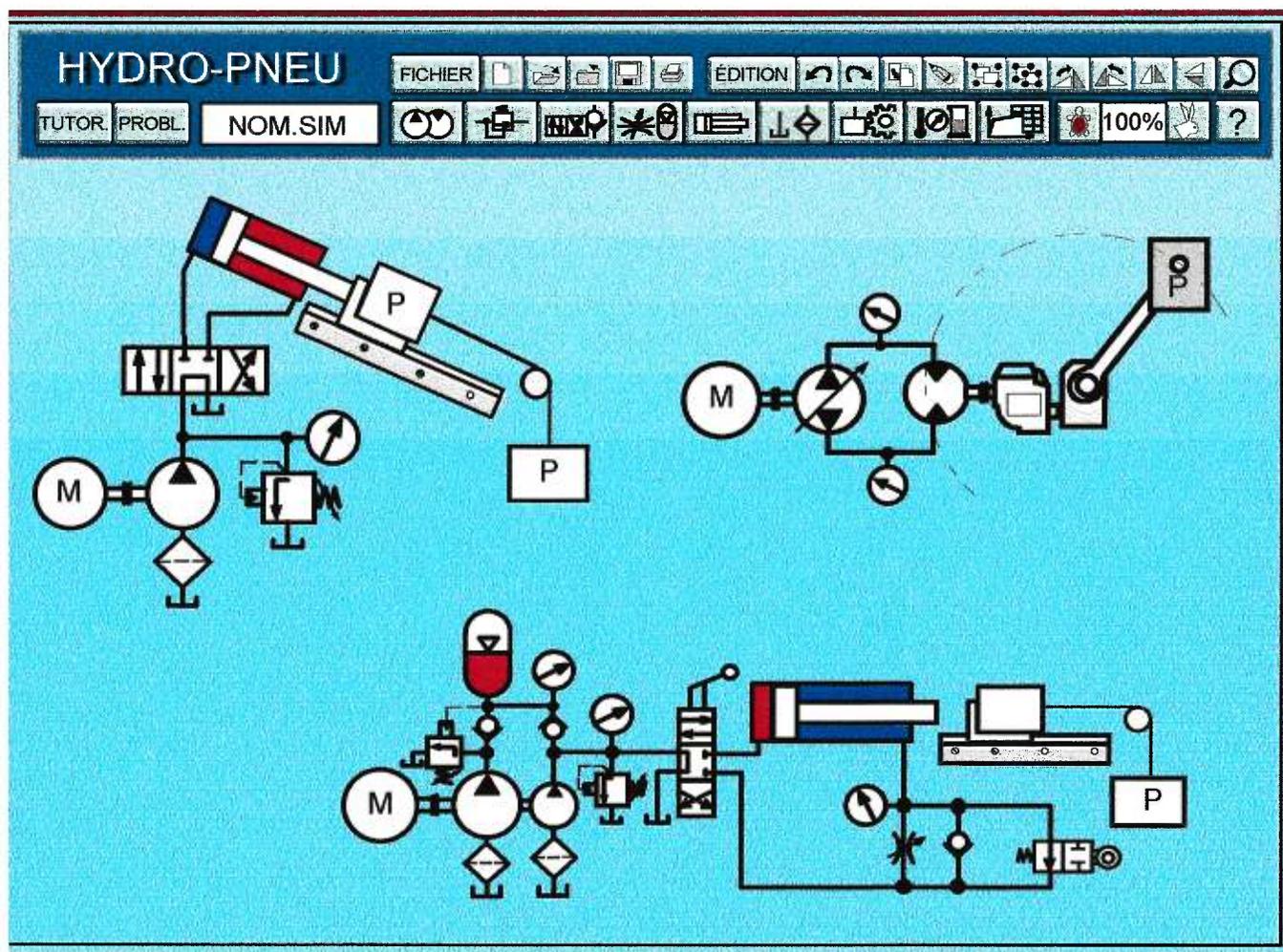
- 5- Les états transitoires des composants hydrauliques qui impliquent le déplacement d'organes mécaniques internes. Il s'agit de représenter, au moyen de pseudo-simulations (ou d'animations) impliquant un nombre restreint de paramètres, l'espace d'évolution position / vitesse, débit / vitesse ou pression / vitesse, les phénomènes dynamiques relatifs au temps de réaction des composants et qui génèrent des pointes de surpression lors des ouvertures et fermetures. Il s'agit d'illustrer ces phénomènes seulement au niveau qualitatif.

NOTE : Cet aspect n'est pas traité par le prototype actuel. Aussi, il nous paraît le moins essentiel. Il pourra faire l'objet d'un développement ultérieur.

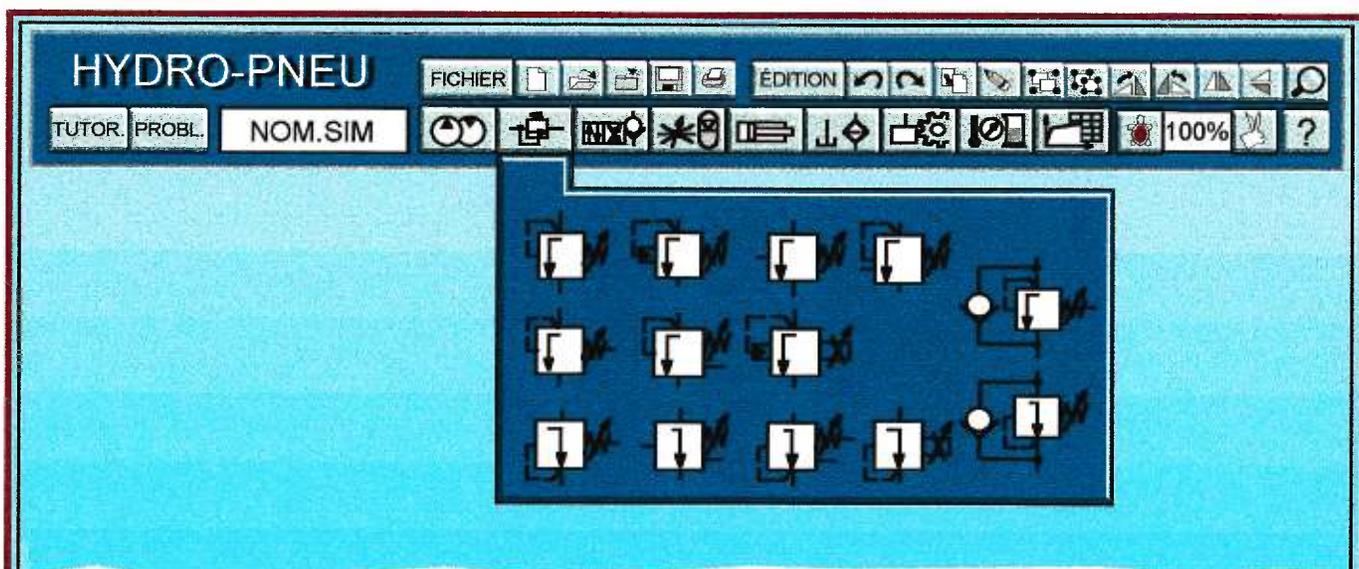
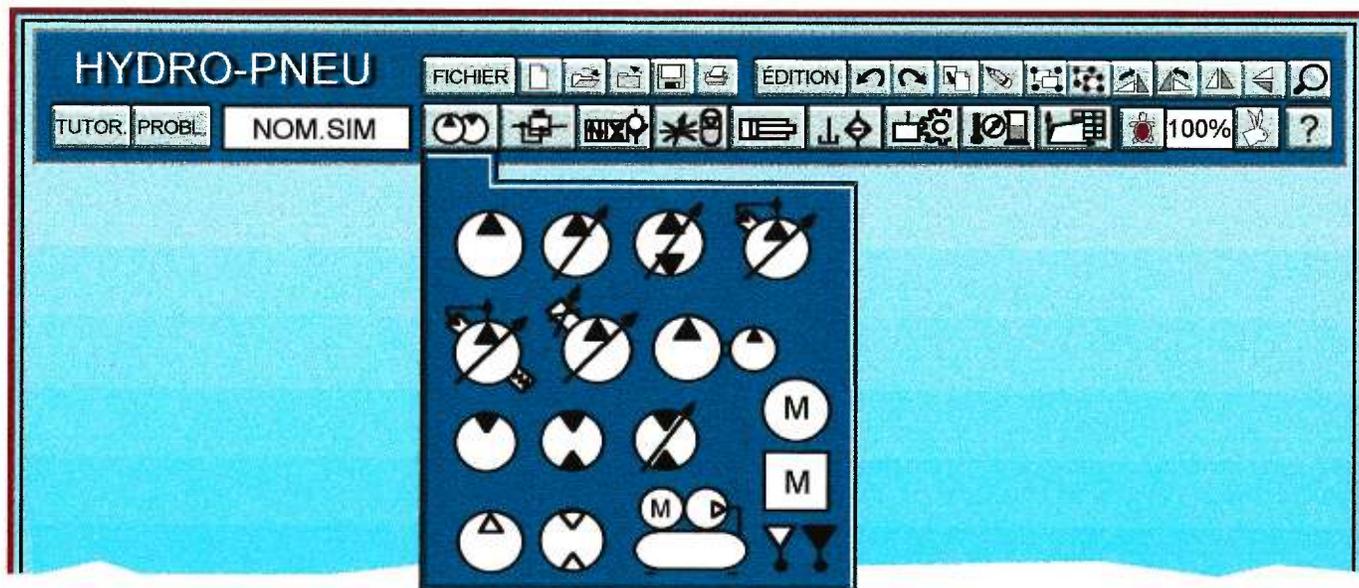
LE MENU DU SIMULATEUR

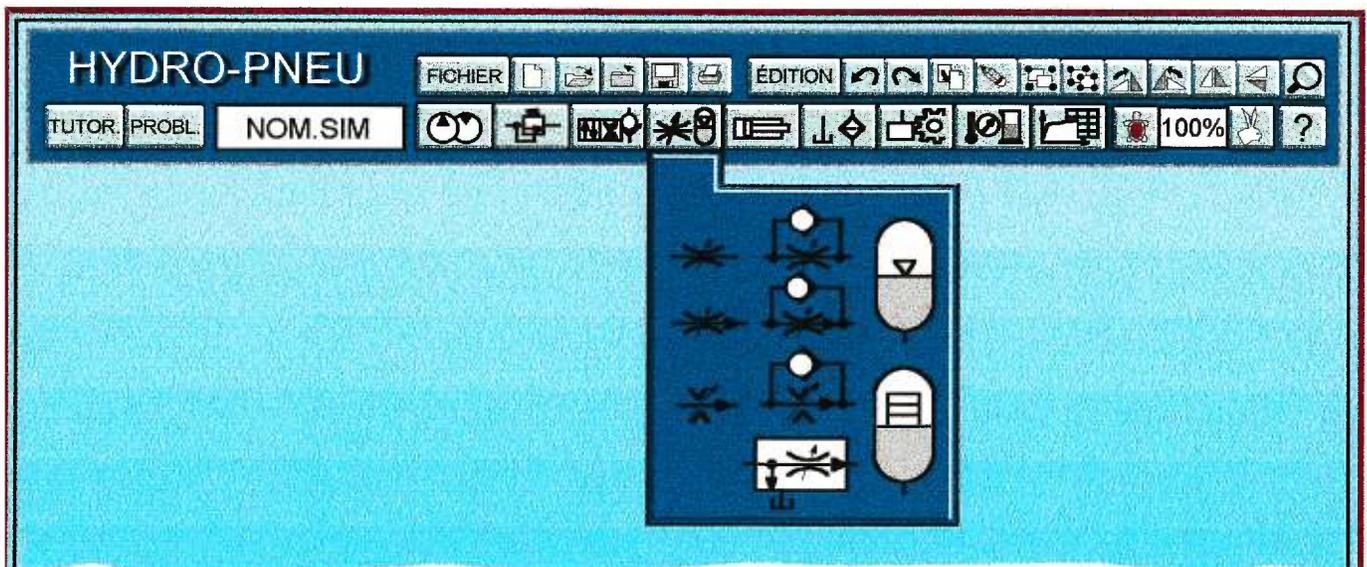
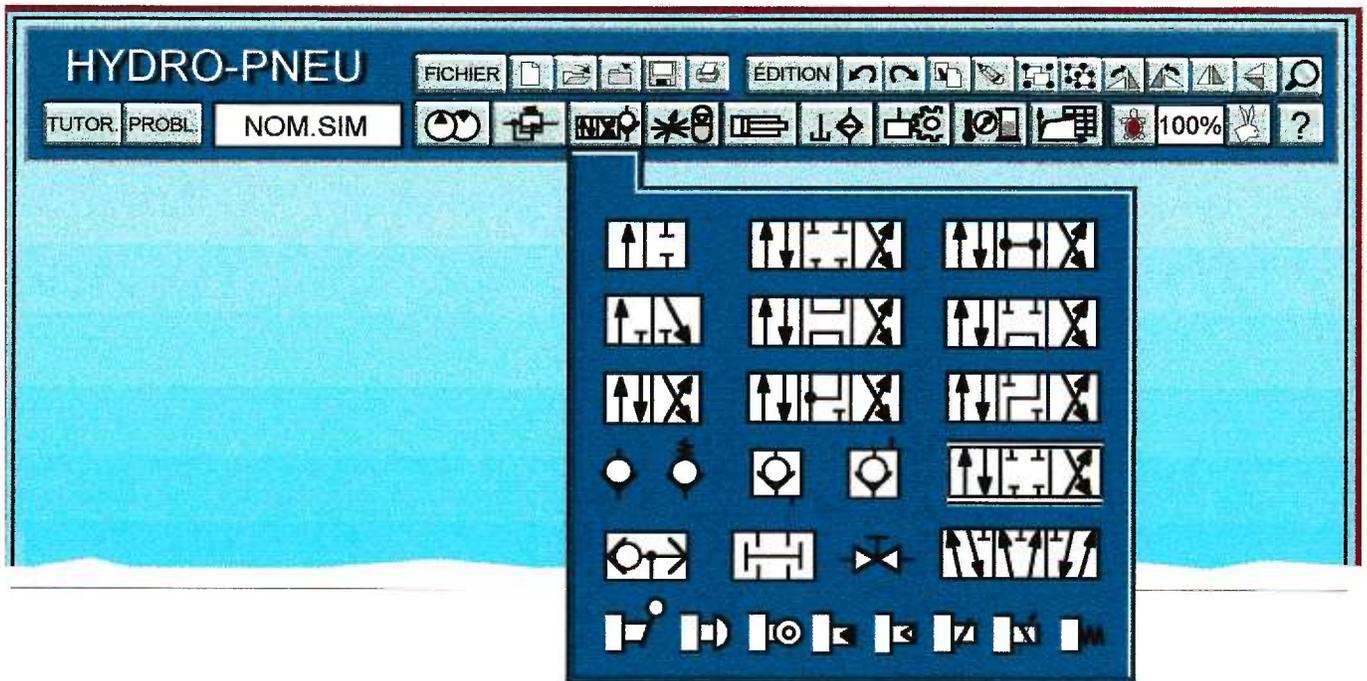
Les figures suivantes illustrent des exemples de la maquette proposée pour l'écran clé du simulateur, avec le menu principal et les sous-menus.

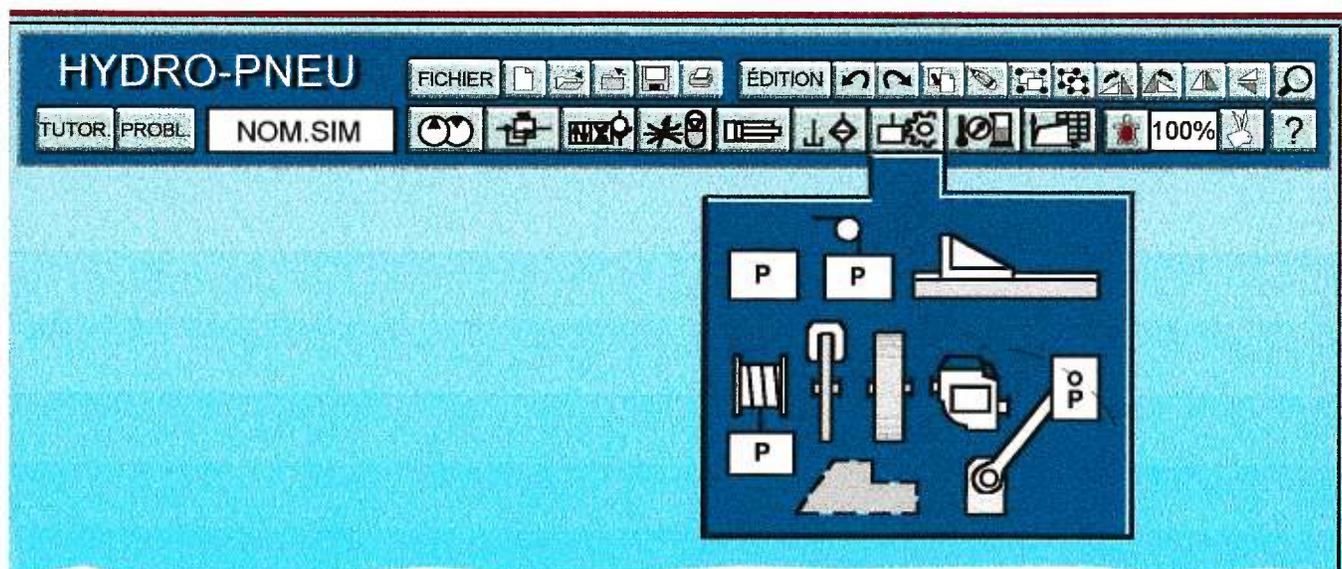
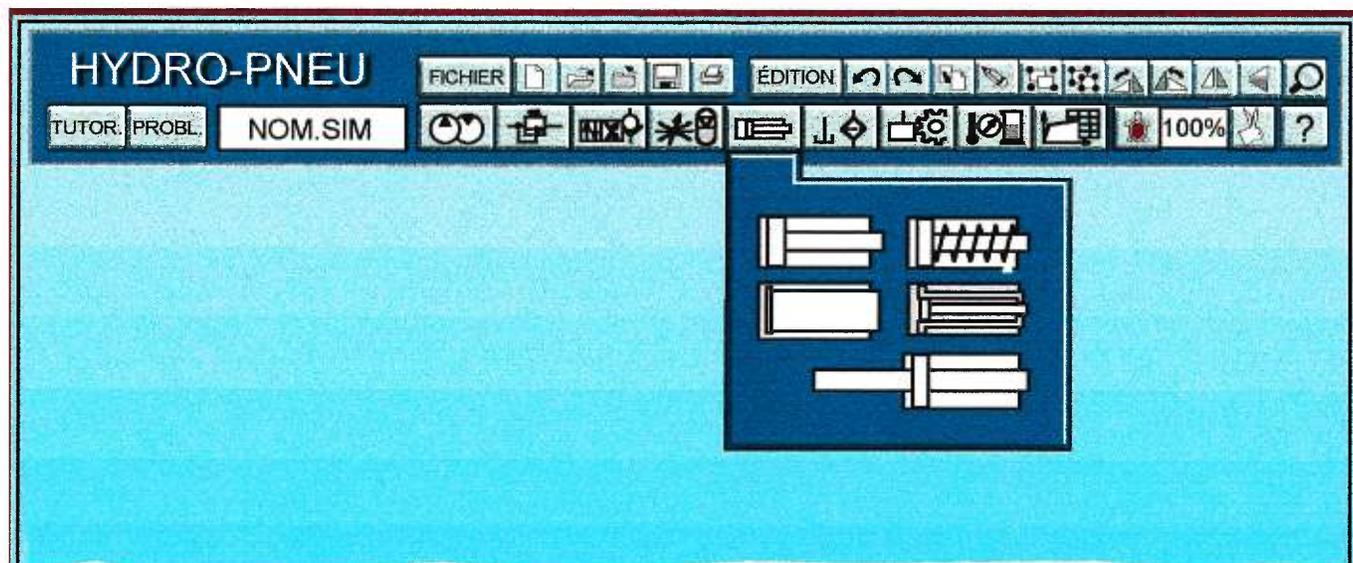
ÉCRAN CLÉ AVEC LE MENU PRINCIPAL ET EXEMPLES DE CIRCUITS

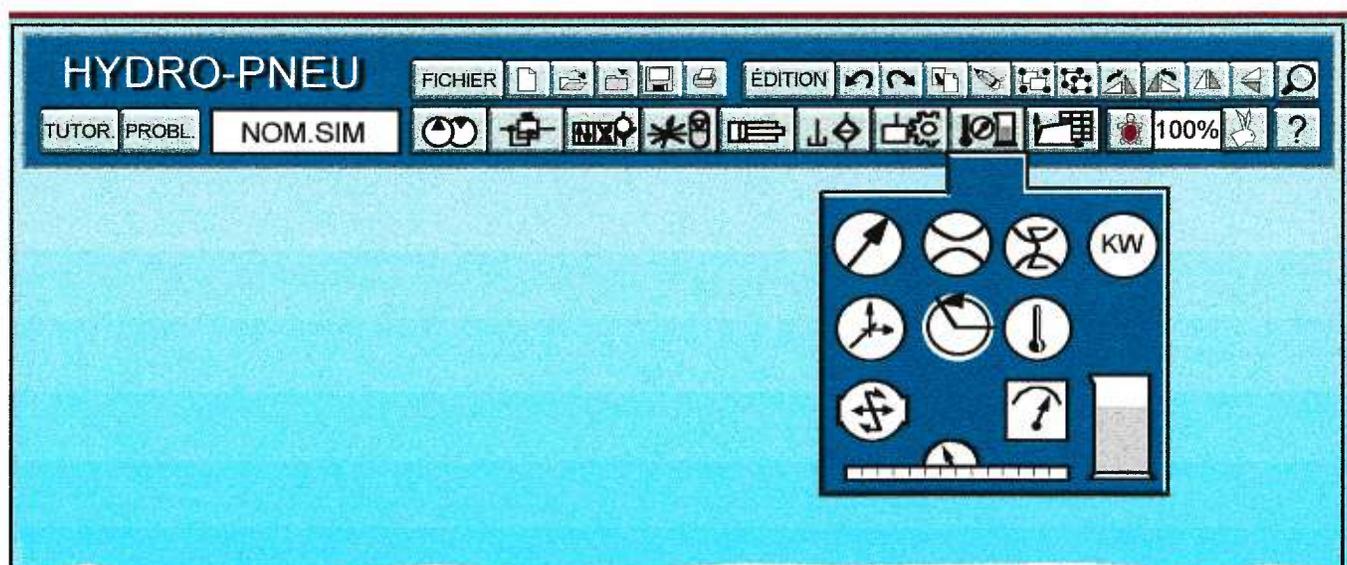


ÉCRAN CLÉ AVEC LE MENU PRINCIPAL ET DIVERS SOUS MENUS









BOUTON TORTUE-LIÈVRE

Cette fonction permet de ralentir ou d'accélérer la simulation, laquelle se fait par défaut en temps réel (100 %). Le facteur maximal de ralentissement sera de 0,1 et celui d'accélération de 10.

On entend par temps réel, la prise en compte de la variable temps selon un degré de précision suffisant pour que les représentations à l'écran des espaces d'évolution position / vitesse permettent des observations significatives du point de vue qualitatif. Ainsi, par exemple, les mouvements rapides qui échappent à l'observation directe ne présentent aucun intérêt particulier. Ces mêmes mouvements peuvent devenir significatifs et intéressants à observer en utilisant un facteur de ralentissement. De manière générale, on peut avancer que tout phénomène dont la durée est inférieure à 0,3 secondes n'a pas à être considéré pour fins de représentation graphique.

BOUTON GRAPHEUR-TABLEUR

Donne accès, au choix, à un tableur ou à un grapheur permettant l'élaboration automatique de tables ou de courbes à partir des données générées par la simulation et enregistrées avec les appareils de mesure présents dans le système. Les courbes se construiront en temps réel, de manière à permettre la visualisation simultanée du comportement du système et de sa représentation graphique. L'utilisateur pourra ainsi mettre en relation cartésienne des grandeurs telles pression-débit pour obtenir les données ou la courbe de rendement et de puissance, température-temps pour la courbe d'équilibre thermique et d'énergie dissipée, etc.

LE TUTORIEL

EXEMPLE DE L'ÉCRAN CLÉ AVEC :

- LE MENU D'ÉDITION DE TEXTE ET DE GRAPHIQUES
- LE MENU DE NAVIGATION
- EXEMPLE DE CONTENUS

HYDRO-PNEU

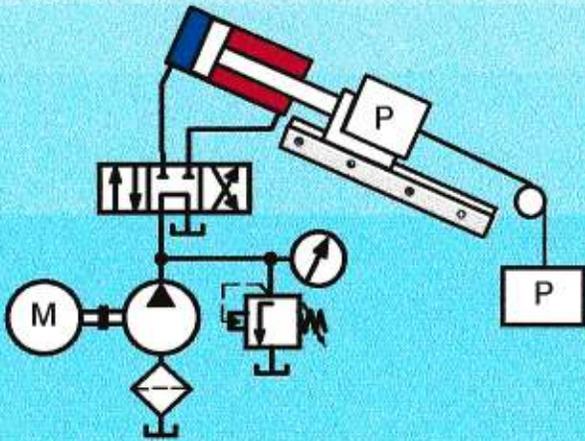
FICHER ÉDITION

SIMUL. PROBL. NOM.SIM

100%

Dans le système illustré, deux charges différentes s'appliquent au vérin.

Une d'elles est menante et l'autre résistante. Déterminer dans quelles conditions.




1- Déterminer la valeur maxi. de la charge

2- Donner le réglage du L.P.

3- Donner les pressions au manomètre :

- pendant la montée

- pendant la descente

OK

RÉSUMÉ DES PRINCIPALES ORIENTATIONS À CONSIDÉRER

ASPECTS GÉNÉRAUX

- Logiciel à trois volets :
 - simulateur seul,
 - tutoriel / simulateur (avec éditeur de leçons : texte, graphique et boutons de dialogue),
 - banque de problèmes de laboratoire / simulateur.
- Simulation de systèmes complets, c'est-à-dire en interaction avec des mécanismes, charges, etc.
- Fonctions de représentation :
 1. états en régime stable (hydraulique et pneumatique),
 2. états en régime transitoire (hydraulique et pneumatique),
 3. états semi-stables (mouvement saccadé des vérins pneumatiques),
 4. représentation du principe de fonctionnement interne des composants (vues en coupe animées).
 5. états transitoires des composants hydrauliques qui impliquent le déplacement d'organes mécaniques internes (temps de réponse)
- Temps réel : pour fins de représentation qualitative des phénomènes seulement.
- Concept de laboratoire virtuel d'expérimentation.
- Grapheur : illustration simultanée du phénomène et de sa représentation graphique,
- Utilisation de composants «altérés» pour le diagnostic de pannes.
- Les conduits, devraient-ils être en couleur (rouge, bleu...) selon la pression ?

PHÉNOMÈNES

- Forces de frottement statiques et dynamiques.
- Composants «théoriques» (rendement = 100 %) et «réels» (rendement < 100 %), ce qui implique tenir compte des fuites internes des composants, des couples de démarrage, etc.
- Transformation de l'énergie en chaleur : évolution du bilan thermique du système.

- Mécanismes usuels : glissière avec masse et frottement, poulie avec masse gravitationnelle, volant d'inertie, treuil, réducteur de vitesses, frein à disque, charge avec bras oscillant (balourd), autres (?).
- Masse / accélération / inertie.
- Effets des forces menantes, pertes de contrôle et cavitation (vide).
- Appareils de mesure courants (manomètre, débitmètre...) et «didactiques» (chronomètre à déclenchement par seuils de pression, wattmètre : débit x pression, etc.).

ANNEXE III
SITUATIONS D'APPRENTISSAGE DÉVELOPPÉES
AVEC LE LOGICIEL HYDRO+PNEU[©]

SITUATIONS D'APPRENTISSAGE DÉVELOPPÉES AVEC LE LOGICIEL HYDRO+PNEU[©]

Les situations d'apprentissage présentées ici, constituent des applications de systèmes hydrauliques et pneumatiques. Elles ont été construites avec le logiciel Hydro+Pneu[©].

Chaque situation est accompagnée d'une description des systèmes à l'étude, des objectifs poursuivis, des concepts qui sont mis à contribution, de la configuration expérimentale de départ, des observations et constatations que l'on peut réaliser durant les expérimentations, ainsi que de propositions de modification de la configuration de départ afin de permettre une exploration plus approfondie de la situation.

Ces descriptions ont été élaborées dans une optique d'orientation générale, dans le but d'amener l'étudiant à tirer le meilleur profit des situations, tout en lui laissant la latitude et l'initiative voulues inhérentes à la démarche expérimentale.

Les illustrations présentées ici constituent des saisies d'écran, prises en cours de simulation. Bien entendu, elles sont «statiques». Elles montrent un instant particulier d'une série d'événements. En ce sens, elles ne rendent pas compte de l'ensemble des aspects décrits. Seule une exécution informatique permettrait d'apprécier pleinement la richesse expérimentale des situations.

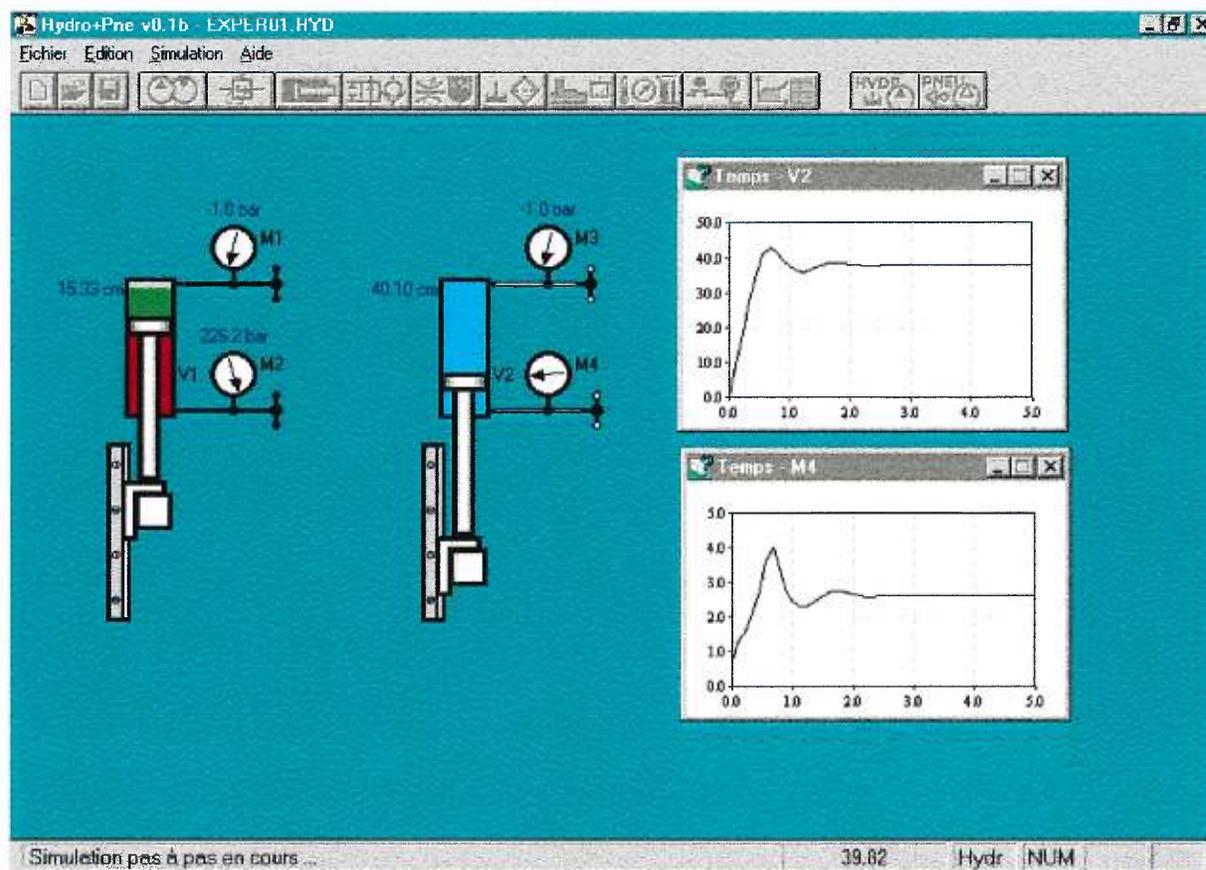
LISTE DES SITUATIONS D'APPRENTISSAGE

<u>NOM DU FICHIER</u>	<u>TITRE</u>
Exper 1	Incompressibilité / compressibilité
Exper 2	Frottements mécaniques
Exper 3	Frottements visqueux
Exper 4	Frottements mécaniques et visqueux avec limiteur de débit
Exper 5	Lois de l'écoulement des liquides et des gaz
Exper 6	Vérin pneumatique : vitesse irrégulière
Exper 7	Vérins pneumatiques : vitesses décroissantes
Exper 8	Système hybride oléo-pneumatique
Exper 9	Rendement volumétrique d'une pompe
Exper 10	Saturation des limiteurs de pression d'action directe et pilotée
Exper 11	Saturation des limiteurs et des régulateurs de débit
Exper 12	Effets des forces d'inertie et de frottement sec

Exper 13	Effets des forces d'inertie, de frottement sec et de frottement visqueux
Exper 14	Circuit linéaire simple avec pompe à cylindrée variable
Exper 15	Équilibre thermique d'un système hydraulique
Exper 16	Circuit avec réserve par accumulateur
Exper 17	Circuit avec vérins en parallèle
Exper 18	Circuit séquentiel avec vérins en parallèle
Exper 19	Circuit avec vérins en série
Exper 20	Circuit de régénération
Exper 21	Circuit d'équilibrage (contre-balancement)
Exper 22	Circuits avec verrouillages de sécurité
Exper 23	Circuit simple à deux vitesses
Exper 24	Circuit à deux vitesses avec pompe à cylindrée variable par compensateur
Exper 25	Circuit à deux vitesses avec double pompe et accumulateur
Exper 26	Circuit rotatif ouvert (treuil)
Exper 27	Circuit rotatif fermé (transmission hydrostatique), avec protections
Exper 28	Circuit complexe avec noeuds multiples
Exper 29	Montages mécaniques
Exper 30	Circuit de synchronisation de vérins

Exper 1

Titre : Incompressibilité / compressibilité



DESCRIPTION

Cette expérimentation consiste à comparer le comportement de deux systèmes semblables mais de technologie distincte : l'un hydraulique, à gauche, l'autre pneumatique.

OBJECTIFS

Observer l'effet de l'incompressibilité de l'huile et de la compressibilité de l'air sur le comportement des systèmes. Observer l'effet des fuites par les joints d'étanchéité du piston d'un vérin. Observer le phénomène du vide dans un vérin.

CONCEPTS MIS À CONTRIBUTION

Incompressibilité des liquides, compressibilité des gaz, liquide sous vide (cavitation) et volume sous vide.

SIMULATION : ÉTAPE I

CONFIGURATION

Les deux montages sont semblables : hydraulique à gauche, pneumatique à droite. Notez que les ports des deux vérins sont bloqués (bouchés) avec des raccords auto-obturants en TÉ. Il n'y a aucun apport de fluide venant d'une pompe, d'un réservoir ou autre source. Les conduits et raccords hydrauliques sont noirs, tandis que les pneumatiques sont blancs.

OBSERVATIONS

Le vérin pneumatique (à droite), entraîné par le poids de la charge de la glissière, descend très rapidement et «rebondit» sous l'effet de la compressibilité de l'air qui reste emprisonné dans la chambre inférieure ; l'air agit de manière semblable à celle d'un ressort. Observez que la position du vérin pneumatique (V2) et la pression dans la chambre inférieure (M4) évoluent de concert.

Inversement, le vérin hydraulique (à gauche) ne descend que très lentement, malgré que le poids de la charge de la glissière est beaucoup plus important. En fait, la descente est seulement possible à cause des fuites dans les joints du piston. Ces fuites permettent à l'huile de passer de la chambre inférieure (sous pression, en rouge), vers la chambre supérieure. À mesure que le vérin descend, il se crée un volume vide dans la partie supérieure ; l'huile sous vide apparaît en vert, alors que le volume vide proprement dit est transparent. Ce volume vide est dû au fait que, pour un déplacement donné, le volume en dessous du piston est plus petit que celui au dessus, à cause de la tige ; en d'autres mots, le volume qui reste vide correspond à celui de la tige qui sort du vérin.

À la fin de course, la pression dans le faible volume d'huile qui reste dans la chambre inférieure tombe à -1 bar et devient vert ; autrement dit, lorsqu'il n'y a plus de transfert d'huile entre les deux chambres, les pressions s'équilibrent.

SIMULATION : ÉTAPE II

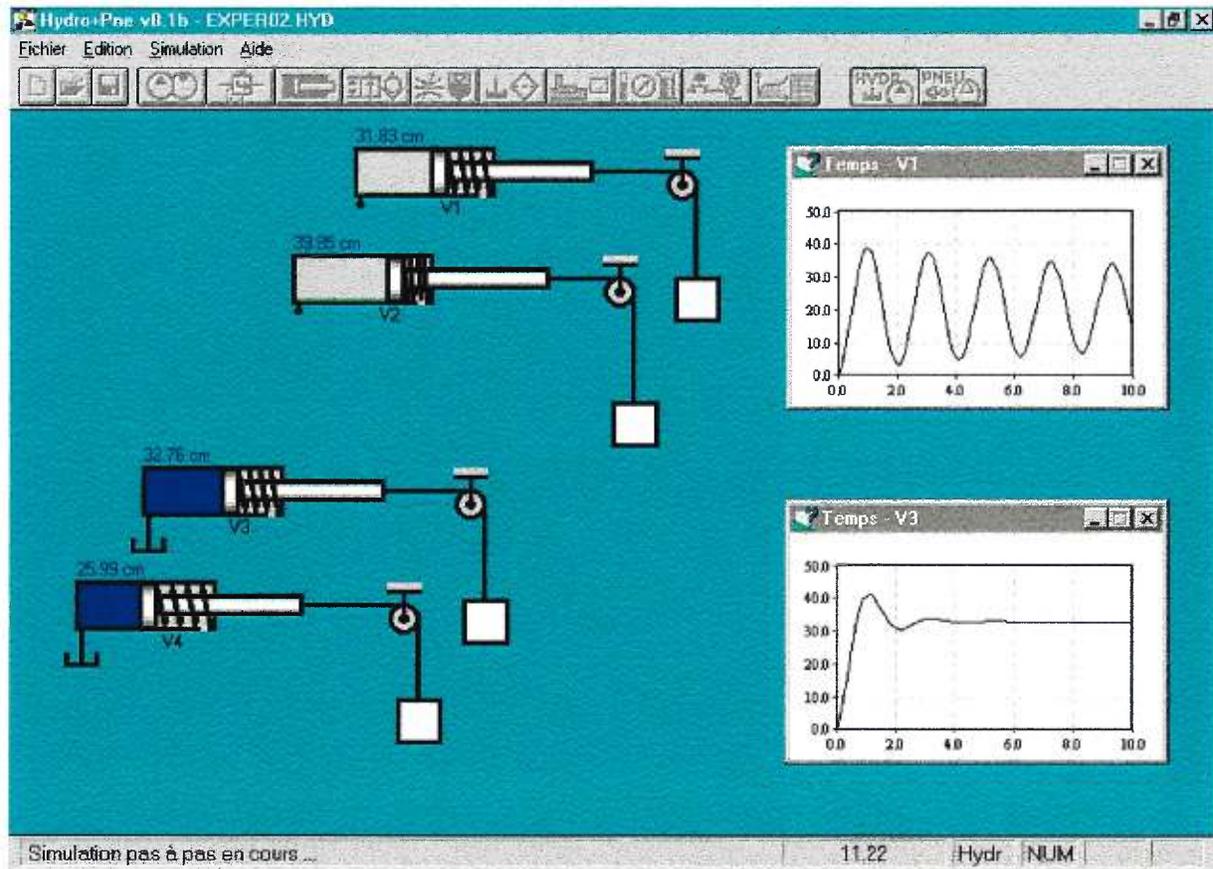
CONFIGURATION

Dans la boîte de dialogue des vérins, choisissez d'autres valeurs de fuites internes. Aussi, dans la boîte de dialogue de la glissière, choisissez d'autres valeurs de charge.

OBSERVATIONS

Observez l'influence de chacun de ces changements sur le comportement des systèmes. Comparez-le au précédent. Constatez que, même lorsqu'on choisit l'option «aucune fuite interne par les joints» des vérins, ceux-ci descendent très légèrement ; ceci illustre la difficulté d'obtenir une étanchéité parfaite. Constatez aussi que si la charge appliquée sur le vérin pneumatique est assez grande, le piston descend et ne rebondit pas. Ceci est causé par le fait que le piston frappe la fin de course et que la pression de l'air qui reste emprisonné est insuffisante pour faire «rebondir» la charge.

Exper 2

Titre : Frottements mécaniques

DESCRIPTION

Cette expérimentation consiste à comparer l'effet de divers types de frottements sur le comportement des systèmes. Elle comporte quatre montages hydrauliques dont les vérins (à simple effet) sont soumis à différents types de frottements.

OBJECTIFS

Observer l'effet des frottements mécaniques et visqueux sur le comportement des systèmes. Observer l'effet du vide et le remplissage des vérins sous l'effet de la pression atmosphérique.

CONCEPTS MIS À CONTRIBUTION

Frottement mécanique, frottement visqueux, liquide sous vide (cavitation), volume sous vide, pression atmosphérique.

SIMULATION : ÉTAPE I**CONFIGURATION**

Cette expérimentation présente quatre montages hydrauliques simples. Les deux vérins d'en haut (V1 et V2) ne comportent aucun branchement (les ports sont bouchés) ; les deux vérins d'en bas (V3 et V4) sont branchés directement au réservoir. Aussi, dans V1 et V3 le frottement mécanique est minimisé ; dans V2 et V4 le frottement est normal ; ce frottement est principalement causé par les joints d'étanchéité du piston et de la tige. Dans les quatre cas, le frottement visqueux est, au départ, minimisé.

OBSERVATIONS

Le mouvement des vérins est affecté par les frottements mécanique et visqueux. Dans V1 les deux frottements sont minimisés ; l'oscillation est importante ; elle diminue lentement. Dans V2 le frottement mécanique est présent ; l'oscillation est disparue. Dans V3 les deux frottements sont minimaux, mais il s'ajoute une arrivée d'huile venant du réservoir, ce qui cause un frottement visqueux significatif qui réduit la durée de l'oscillation. Finalement, dans V4 il y a, en plus, le frottement mécanique ; l'oscillation est absente. Constatez que les positions d'équilibre de V2 et de V4 sont différentes. V2 sort d'avantage que V3 car le frottement total est moins important, ce qui se traduit par une vitesse supérieure de la charge et un arrêt plus tardif.

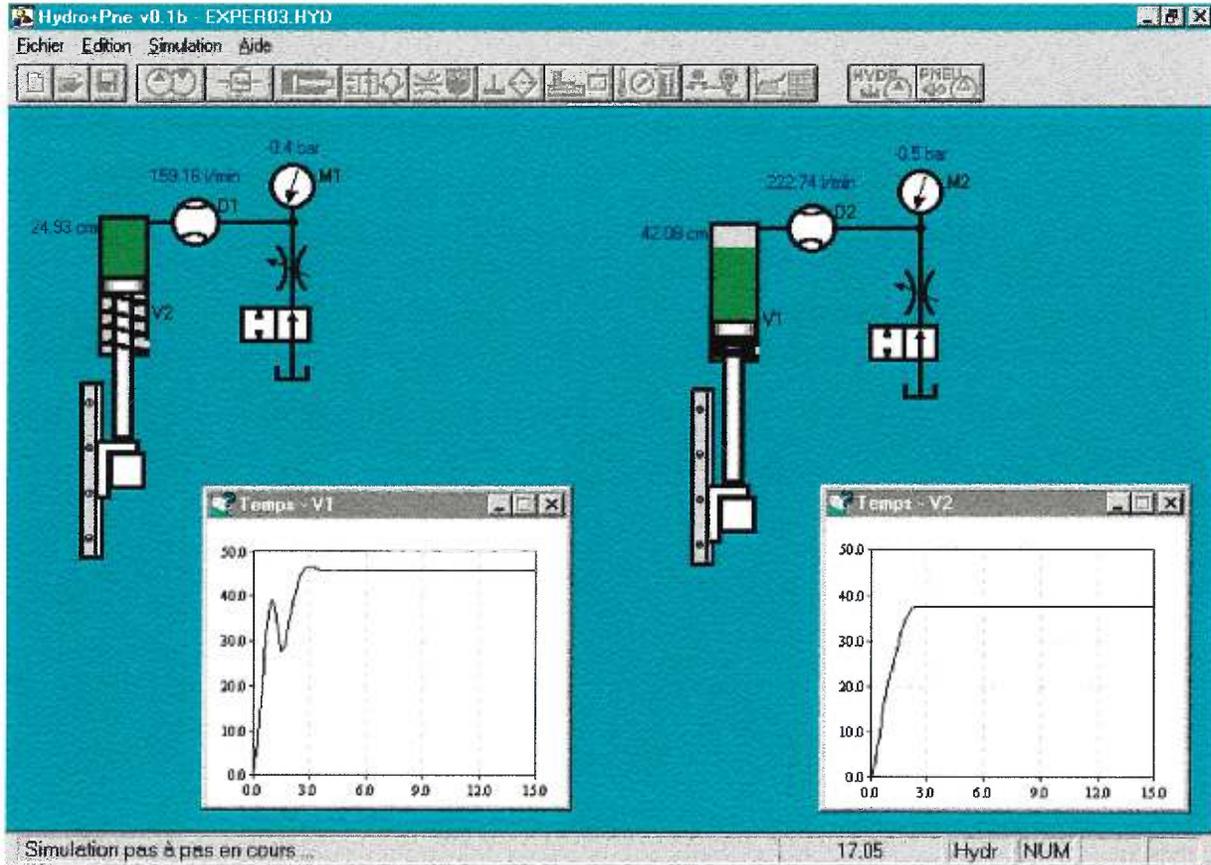
SIMULATION : ÉTAPE II**CONFIGURATION**

Dans les boîtes de dialogue des vérins, ajoutez les frottements visqueux ; modifiez aussi la valeur de la charge gravitationnelle dans la boîte de dialogue de la glissière.

OBSERVATIONS

Remarquez que le frottement visqueux réduit fortement la vitesse des vérins. Contrairement au frottement mécanique, qui offre une résistance constante, celle créée par le frottement visqueux augmente en fonction du carré de la vitesse ; autrement dit, lorsque la vitesse du vérin tend à augmenter, la force de frottement visqueux s'accroît rapidement. Ainsi, une augmentation importante de la charge ne produit qu'une légère augmentation de la vitesse du vérin. Contrairement, la force de frottement visqueux tend à disparaître lorsque la vitesse est très faible. À l'aide de la souris, cliquez sur la tige des vérins et déplacez-la ; constatez que le vérin ne s'arrête pas nécessairement au même point que lors de la première simulation. Ceci est dû notamment au fait que la force de frottement agit dans les deux sens du mouvement.

Exper 3

Titre : Frottements visqueux

DESCRIPTION

Cette expérimentation est complémentaire de la précédente. Elle consiste à observer plus amplement l'effet de divers types de frottements sur le comportement des systèmes hydrauliques.

OBJECTIFS

Observer l'effet des frottements mécaniques et visqueux sur le comportement des systèmes. Observer le remplissage des vérins sous l'effet de la pression atmosphérique, au moyen d'un conduit qui comporte une restriction de section variable.

CONCEPTS MIS À CONTRIBUTION

Frottements mécanique et visqueux, liquide sous vide (cavitation), volume sous vide, pression atmosphérique.

SIMULATION : ÉTAPE I

CONFIGURATION

Cette expérimentation présente deux montages hydrauliques simples. Le vérin du montage de gauche comporte un frottement mécanique, l'autre pas. Lorsqu'on active les distributeurs, l'effet de la pression atmosphérique qui agit dans le réservoir force l'huile à passer par les restrictions et à combler le vide qui se forme dans les vérins. Ceci affecte aussi l'équilibre des forces qui agissent sur les vérins et a pour conséquence de modifier leur position d'équilibre.

OBSERVATIONS

Observez le comportement des vérins ; au début, celui de gauche ne produit aucun mouvement. La force de frottement additionnée à la force qui résulte de la pression atmosphérique agissant sur la surface de la couronne du piston, est supérieure au poids de la charge. Le manomètre M1 indique - 0,8 bar, soit une pression proche du vide. Le vérin de droite oscille longuement car l'énergie est absorbée lentement par un faible frottement visqueux présent dans les conduits. Le manomètre M2 indique - 1 bar, soit le vide. La chambre supérieure du vérin V2 est transparente car il n'y a pas d'huile, à l'exception d'un trait (vert) au dessus du piston qui illustre un léger volume d'huile qui reste dans les cavités mortes du vérin.

Avec la souris, cliquez sur les tiges et déplacez-les légèrement vers le haut, puis vers le bas. Observez que la position finale d'équilibre du vérin de droite (sans frottement mécanique) est toujours identique. Dans celui de gauche, il y a deux positions limites, une supérieure, l'autre inférieure ; l'écart entre ces deux positions correspond à une force de compression du ressort égale au double de la force de frottement mécanique.

SIMULATION : ÉTAPE II

CONFIGURATION

Activez les distributeurs à divers moments de la simulation

OBSERVATIONS

Constatez les effets sur le comportement des vérins. Observez que les vérins se remplissent graduellement et que l'huile qui entre prend la couleur verte, indiquant qu'elle est sous vide. Lorsque le vide est comblé et que le vérin ne descend plus, la couleur devient bleue, indiquant que l'huile se trouve à la pression atmosphérique.

Observez aussi que la position d'équilibre du vérin de droite est maintenant plus basse qu'auparavant car l'effet du vide est disparu ; le ressort doit maintenant exercer plus de force pour supporter la charge. Chercher les positions limites d'équilibre du vérin de gauche et constatez qu'elles sont aussi plus basses qu'auparavant. De plus, l'écart entre ces positions d'équilibre est moindre car les forces exercées par le ressort à ces positions limites sont plus importantes, mais la différence entre ces forces est identique ; en d'autres mots, à mesure que le ressort se comprime, un même écart de forces implique un différentiel de longueur moindre.

SIMULATION : ÉTAPE III**CONFIGURATION**

Activez l'option «Tenir compte des frottements visqueux» dans la boîte de dialogue des vérins.

OBSERVATIONS

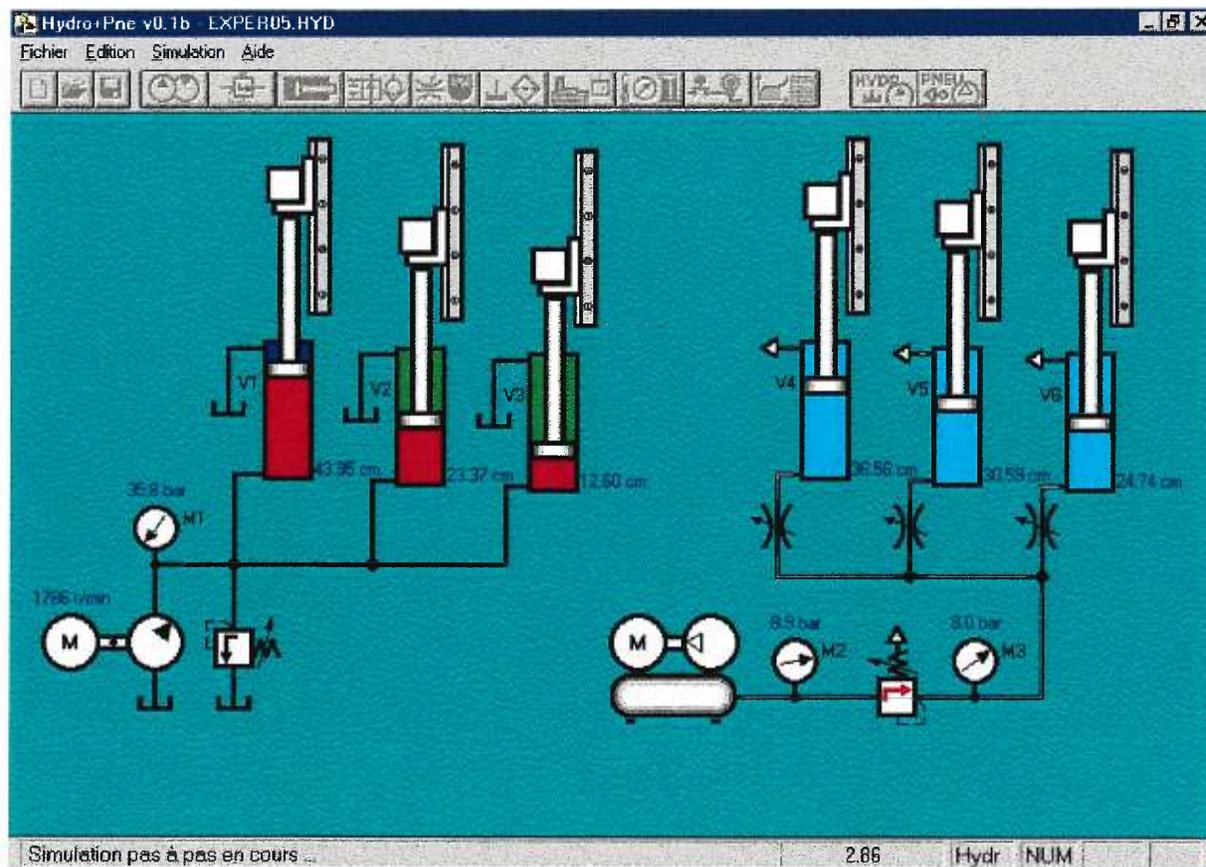
Constatez que le mouvement des vérins est beaucoup plus lent. Cependant, les positions extrêmes d'équilibre sont identiques.

Répétez la simulation en donnant des valeurs croissantes dans la «Force de serrage du mécanisme» de la boîte de dialogue de la glissière. Constatez que les positions extrêmes d'équilibre s'écartent proportionnellement. Si la force est trop importante, le vérin ne descend plus.

Répétez la simulation en utilisant différents coefficients de frottement dynamique dans la glissière. Observez qu'ils produisent des effets analogues à ceux obtenus avec la force de serrage.

Exper 5

Titre : Lois de l'écoulement des liquides et des gaz



DESCRIPTION

Cette expérimentation consiste à observer le comportement et la manière dont se distribuent les liquides et des gaz dans les systèmes hydrauliques et pneumatiques..

OBJECTIFS

Observer la manière différente dont l'huile et l'air comprimé se distribuent dans deux systèmes de topologie similaire. Observer ce comportement sous diverses conditions de débit, de frottements et de charges, dans le but d'analyser et de rendre intelligibles les règles qui sous-tendent ce comportement.

CONCEPTS MIS À CONTRIBUTION

Règles de l'écoulement des fluides, compressibilité et incompressibilité, frottement visqueux.

SIMULATION : ÉTAPE I

CONFIGURATION

Cette expérimentation comporte deux montages similaires, hydraulique à gauche et pneumatique à droite. Dans chacun des montages, les glissières sont munies de charges gravitationnelles croissantes : petite sur le vérin de gauche, moyenne sur celui du centre et grande sur celui de droite.

OBSERVATIONS

Constatez que, dans le montage hydraulique, le vérin muni de la plus petite charge monte en premier et complète sa course, suivi de celui avec la charge moyenne, puis de celui avec la grande charge. Constatez par ailleurs que dans le cas du montage pneumatique, les trois vérins commencent le mouvement sensiblement en même temps et qu'ils avancent à des vitesses inversement proportionnelles aux charges.

SIMULATION : ÉTAPE II

CONFIGURATION

Recommencez la simulation en mode pas-à-pas. Avec la souris, placez tous les vérins vers la mi-course et redémarrez la simulation en mode continu. Au besoin, répétez cette opération plusieurs fois ou déroulez là en mode pas-à-pas pour mieux analyser le détail des événements.

OBSERVATIONS

Constatez que, dans le montage hydraulique, les vérins avec les charges moyenne et grande descendent ensemble (mais à des vitesses différentes) et font monter le vérin avec la petite charge. Lorsque ce vérin atteint la fin de course, le vérin avec la charge moyenne change brusquement de sens et monte à son tour sous l'effet du vérin avec la grande charge. Ce dernier monte finalement sous l'action du débit de la pompe.

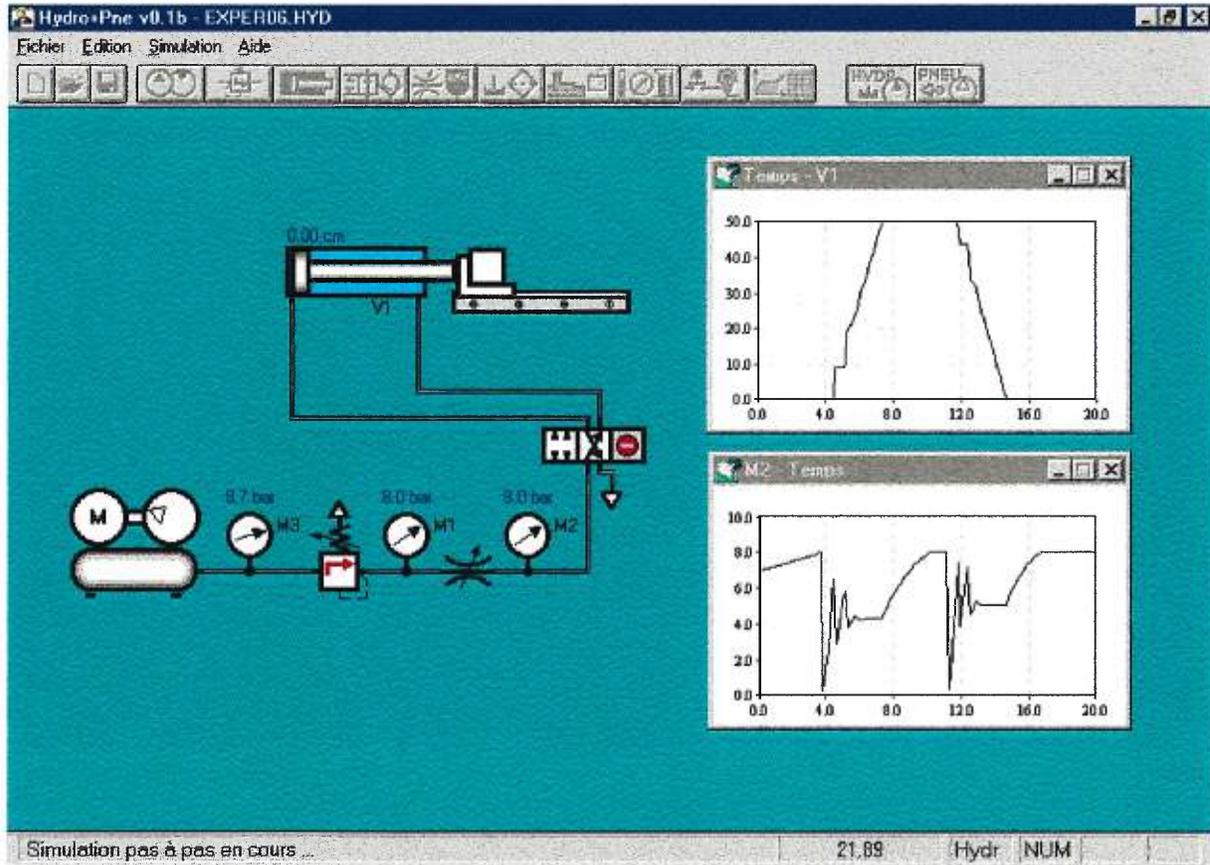
Pour ce qui est du montage pneumatique, constatez qu'il se comporte tout comme à l'étape précédente : les trois vérins commencent le mouvement sensiblement en même temps et avancent à des vitesses inversement proportionnelles aux charges.

Il serait pertinent de refaire au besoin ces expérimentations, en plaçant les vérins à différentes positions, afin de constater la répétabilité de ces comportements.

Cette expérimentation permet de dégager les deux règles suivantes qui explicitent les comportements observés :

1. Le débit des liquides emprunte le conduit qui offre la moindre résistance (moindre pression) à son écoulement.
2. Le débit des gaz se distribue dans tous les conduits de manière inversement proportionnelle à la résistance qu'ils offrent à son écoulement.

Exper 6

Titre : Vérin pneumatique : vitesse irrégulière

DESCRIPTION

Cette expérimentation consiste à observer l'effet de la compressibilité de l'air sur la vitesse d'un vérin pneumatique.

OBJECTIFS

Observer l'effet de la compressibilité de l'air sur la régularité du mouvement du vérin et les interactions entre la compressibilité de l'air et les forces variables qui agissent sur le vérin (passage du frottement statique au dynamique et effet de l'inertie).

CONCEPTS MIS À CONTRIBUTION

Compressibilité des gaz, frottement mécanique statique et dynamique, inertie, pression, débit.

SIMULATION : ÉTAPE I**CONFIGURATION**

Dans ce montage pneumatique, le vérin est alimenté par l'air qui provient du compresseur à travers une restriction. Étant donné que cette restriction se trouve dans la ligne d'alimentation (en amont du vérin), son effet se manifeste autant pendant l'entrée que pendant la sortie du vérin. Lorsque on active le distributeur, l'air est dirigé vers le vérin et provoque son déplacement.

OBSERVATIONS

Constatez que le vérin ne se déplace pas immédiatement après l'action sur le distributeur car le débit d'air n'arrive que progressivement. Observez aussi que, dans un premier temps, le vérin avance de manière saccadée et qu'entre chaque mouvement il se produit une baisse soudaine de pression au manomètre M2, suivie d'une remontée graduelle.

Ce mouvement saccadé est causé par la variation des forces qui agissent sur le vérin. Ainsi, lorsque la glissière passe du repos au mouvement, la force de frottement diminue. Cependant, étant donné que dans la chambre du vérin la pression est suffisamment haute pour vaincre la force (plus importante) du frottement statique, le vérin avance pour ainsi dire, trop rapidement et trop loin, par rapport au débit qu'il reçoit. Ainsi, la pression tombe en dessous de celle qui correspond à la force de frottement statique et le vérin s'arrête momentanément. Étant donné que le débit continue à arriver, la pression augmente à nouveau et atteint encore une fois celle nécessaire pour vaincre la force de frottement statique.

Le phénomène se répète ainsi mais avec intensité décroissante car, à mesure que le vérin avance et que le volume de la chambre du vérin augmente, les changements de pression sont moins rapides.

SIMULATION : ÉTAPE II**CONFIGURATION**

Modifiez la section de passage du limiteur de débit.

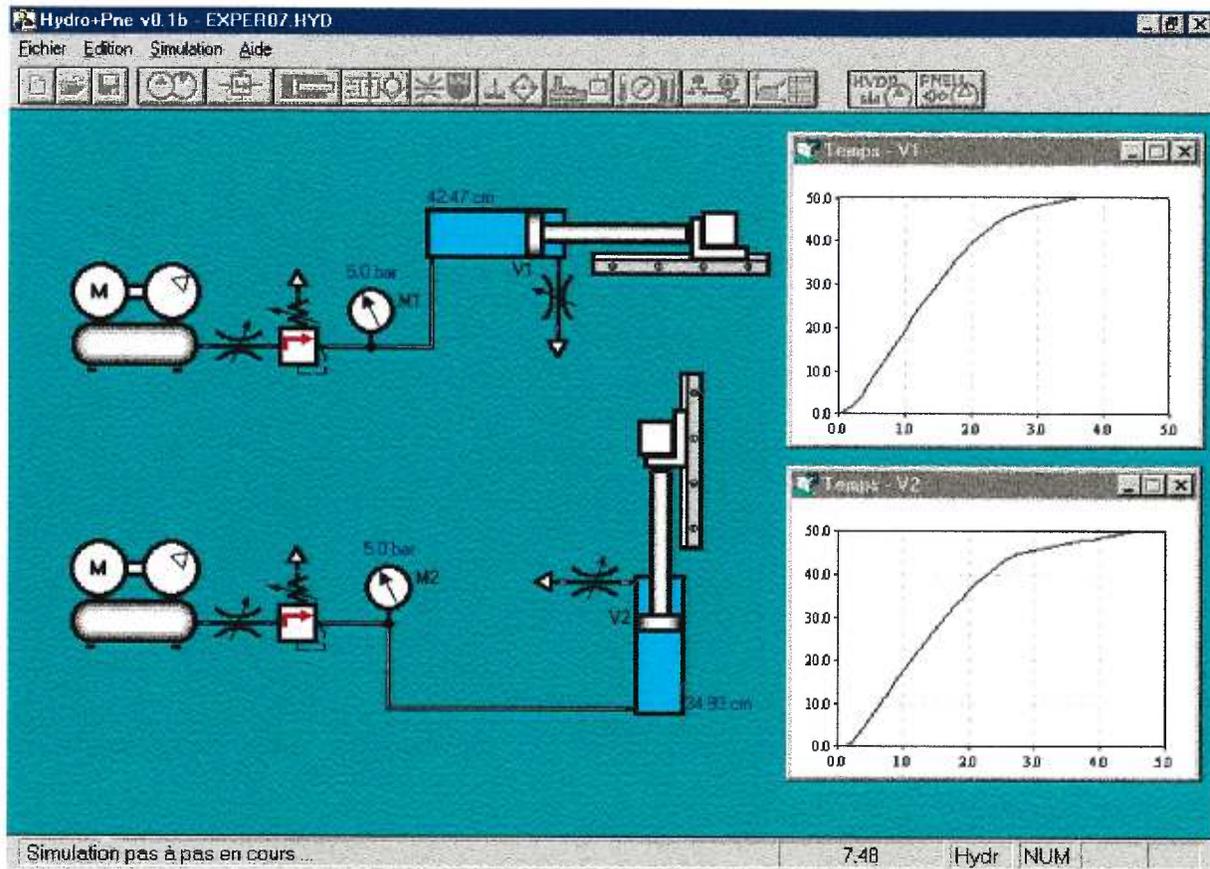
Modifiez aussi l'écart entre les coefficients de frottement statique et dynamique, ainsi que la masse de la glissière et la force de frottement.

Modifiez aussi les dimensions du vérin, soit la course et les diamètres du piston et de la tige.

OBSERVATIONS

Constatez les effets de chacun de ces changements sur la régularité du mouvement du vérin. Observez que, plus le débit est important, moins le phénomène des à-coups se manifeste. Inversement, plus l'écart entre les coefficients de frottement est grand, plus il devient apparent.

Exper 7

Titre : Vérins pneumatiques : vitesses décroissantes

DESCRIPTION

Cette expérimentation est complémentaire de la précédente. Elle permet de voir plus amplement l'effet de la compressibilité de l'air sur la vitesse d'un vérin pneumatique, sous d'autres conditions d'alimentation.

OBJECTIFS

Observer l'effet de la compressibilité de l'air sur la régularité du mouvement du vérin sous des conditions idéales, c'est-à-dire lorsque les forces sont assez constantes, et avec une restriction du débit par la sortie.

CONCEPTS MIS À CONTRIBUTION

Compressibilité des gaz, frottement mécanique statique et dynamique, inertie, pression, débit.

SIMULATION : ÉTAPE I

CONFIGURATION

Dans ces deux montages pneumatiques, les vérins sont alimentés par l'air qui provient du compresseur, sans aucune restriction de débit. Les masses et les coefficients de frottement des glissières sont identiques dans les deux cas. La restriction de débit placée à la sortie permet de minimiser le phénomène du mouvement saccadé observé lors de l'expérimentation précédente et de régler, au mieux, la vitesse des vérins.

OBSERVATIONS

Constatez que les vérins ne se déplacent plus de manière saccadée. Toutefois, leur vitesse diminue progressivement jusqu'à ce que les forces qui agissent de chaque côté du vérin s'équilibrent. L'action des restrictions permet d'obtenir une vitesse constante, mais seulement après que cet équilibre des forces est atteint. Encore faut-il que la charge appliquée au vérin soit constante. Ces montages illustrent le problème fondamental que présente l'irrégularité du mouvement produit par les vérins pneumatiques.

SIMULATION : ÉTAPE II

CONFIGURATION

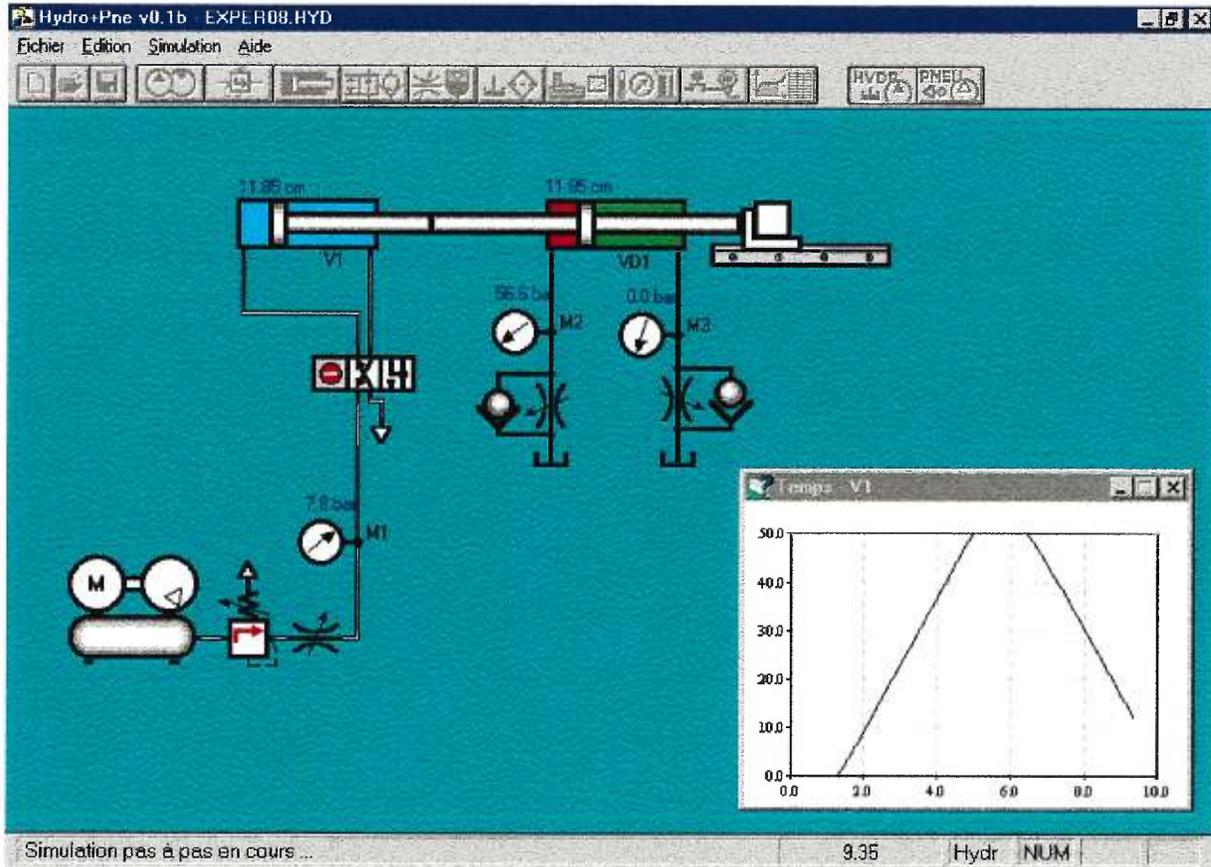
Modifier, tour à tour, les divers paramètres qui déterminent la vitesse du vérin (ouverture de la restriction, dimensions du vérin, pression de l'air d'alimentation)

OBSERVATIONS

Constatez que, plus la vitesse du vérin est faible, plus l'irrégularité du mouvement est importante. Constatez aussi la difficulté, avec les moyens impliqués, de réduire ce problème, somme toute reliée à la compressibilité de l'air.

L'expérimentation suivante présente une solution hybride à ce problème, c'est-à-dire un système dont l'énergie est de source pneumatique, conjointement avec un système hydraulique (incompressible) qui permet de régler la vitesse du vérin.

Exper 8

Titre : Système hybride oléo-pneumatique

DESCRIPTION

Cette expérimentation permet d'étudier les systèmes de technologie hybride, pneumatique et hydraulique.

OBJECTIFS

Étudier l'effet combiné de la compressibilité des gaz et de l'incompressibilité des liquides dans un montage de technologie hybride. Observer la régularité du mouvement d'un vérin pneumatique, couplé mécaniquement à un vérin hydraulique au moyen duquel se fait le réglage de la vitesse.

CONCEPTS MIS À CONTRIBUTION

Compressibilité des gaz, frottement mécanique statique et dynamique, inertie, pression, débit.

SIMULATION : ÉTAPE I**CONFIGURATION**

Cette expérimentation présente un montage oléo-pneumatique. Le vérin à double effet pneumatique constitue la source d'énergie. Le vérin à double tige constitue un moyen passif dont la seule raison d'être est de régler la vitesse de l'ensemble, par l'entremise des restrictions réglables. On retrouve ce type de montages est assez fréquemment en raison surtout de son coût relativement faible ; en effet, lorsque l'on dispose d'un réseau d'alimentation d'air comprimé, ce qui est très fréquent dans les industries, cette solution permet d'obtenir un ajustement fin du mouvement des vérins, sans avoir recours aux systèmes hydrauliques complets, plus dispendieux. Toutefois, cette solution comporte aussi des inconvénients reliés notamment à l'encombrement (longueur) du montage et au couplage mécanique des vérins.

OBSERVATIONS

Observez que les vitesses obtenues sont régulières. Installez des débitmètres dans les conduites hydrauliques et constatez que les vitesses ne sont pas identiques lors de la sortie et de la rentrée du vérin. Cette différence est causée par la poussée du vérin pneumatique, laquelle change selon que c'est la surface du piston ou celle de la couronne qui agit.

SIMULATION : ÉTAPE II**CONFIGURATION**

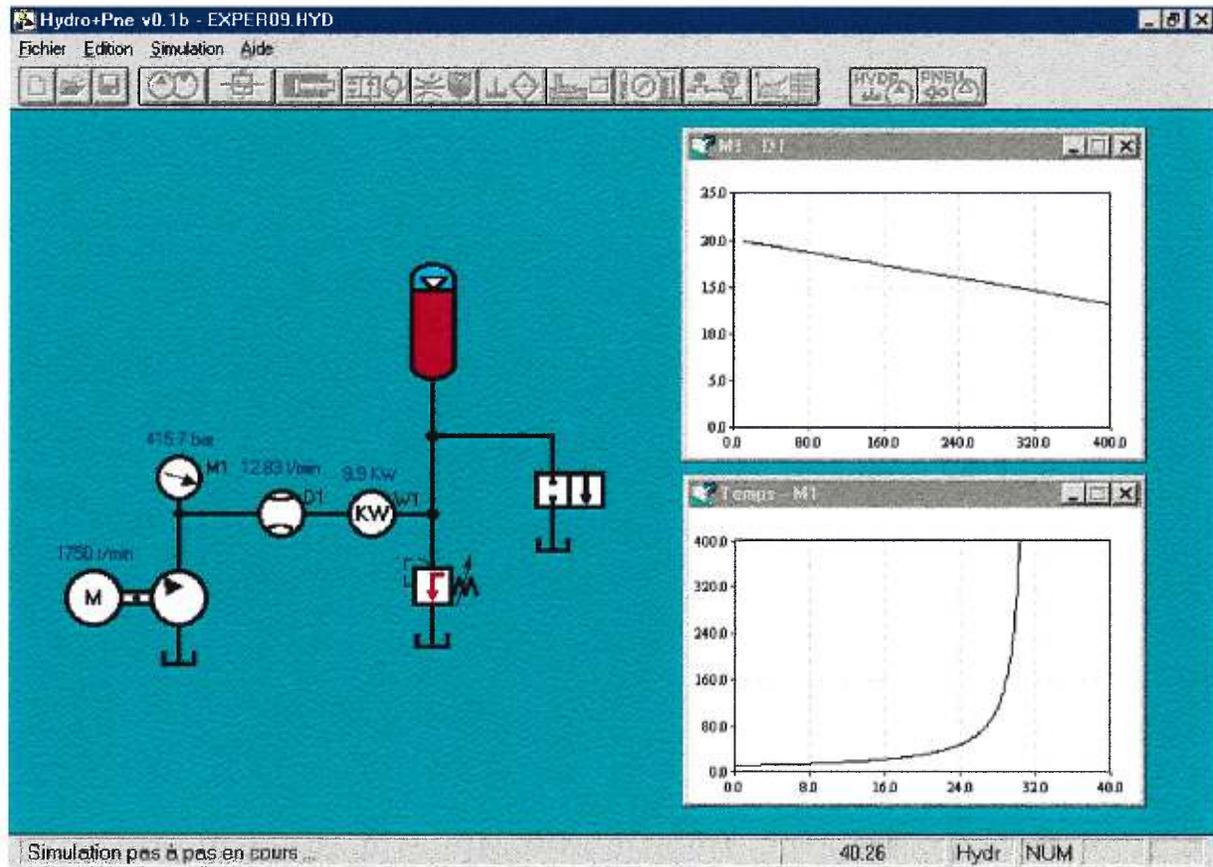
Remplacez les réducteurs de débit par des régulateurs (avec compensateur de pression). Remplacez aussi le vérin pneumatique à double effet par un autre à double tige. Appliquez des charges différentes sur la glissière et des pressions pneumatiques différentes.

OBSERVATIONS

Constatez les résultats en ce qui concerne la différence des vitesses d'entrée et de sortie des vérins.

Exper 9

Titre : Rendement volumétrique d'une pompe



DESCRIPTION

Cette expérimentation consiste à étudier l'effet de la pression sur le débit d'une pompe volumétrique, ainsi que le phénomène de la compressibilité lors du remplissage d'un accumulateur à gaz.

OBJECTIFS

Observer l'effet de la pression sur le débit émis par une pompe volumétrique en fonction de l'effet combiné de son rendement volumétrique et du ralentissement du moteur d'entraînement. Observer le phénomène de la compressibilité du gaz lors du remplissage d'un accumulateur.

CONCEPTS MIS À CONTRIBUTION

Cylindrée, rendement volumétrique, fuites internes, puissance, glissement et décrochage d'un moteur électrique, compressibilité des gaz, gaz de précharge d'un accumulateur.

SIMULATION : ÉTAPE I**CONFIGURATION**

Cette expérimentation présente un montage hydraulique. La pompe remplit l'accumulateur, ce qui fait monter la pression jusqu'à ce qu'elle atteigne la limite du réglage du limiteur de pression. Le distributeur permet de vider l'accumulateur.

OBSERVATIONS

Au départ, la pression dans le système est de 10 bar, soit celle du gaz de précharge de l'accumulateur. Observez que, d'une part, la pression augmente d'abord lentement, puis de plus en plus rapidement ; d'autre part, cette augmentation de pression cause une augmentation des fuites internes de la pompe qui se traduit par une diminution graduelle de son débit. En même temps, il se produit un léger ralentissement du moteur électrique. Ce ralentissement, appelé « glissement », est proportionnel à la puissance absorbée par la pompe. Si cette puissance excède substantiellement la capacité du moteur électrique, soit 200 % de la puissance nominale, il « décroche » et s'arrête. Pour le redémarrer, il suffit de faire un double clic sur le moteur, pourvu que la puissance absorbée ait été préalablement réduite.

SIMULATION : ÉTAPE II**CONFIGURATION**

Modifiez le rendement volumétrique de la pompe.

Modifiez la précharge du gaz de l'accumulateur et observez la différence.

Modifiez le volume de l'accumulateur et observez la différence dans la vitesse de remplissage.

OBSERVATIONS

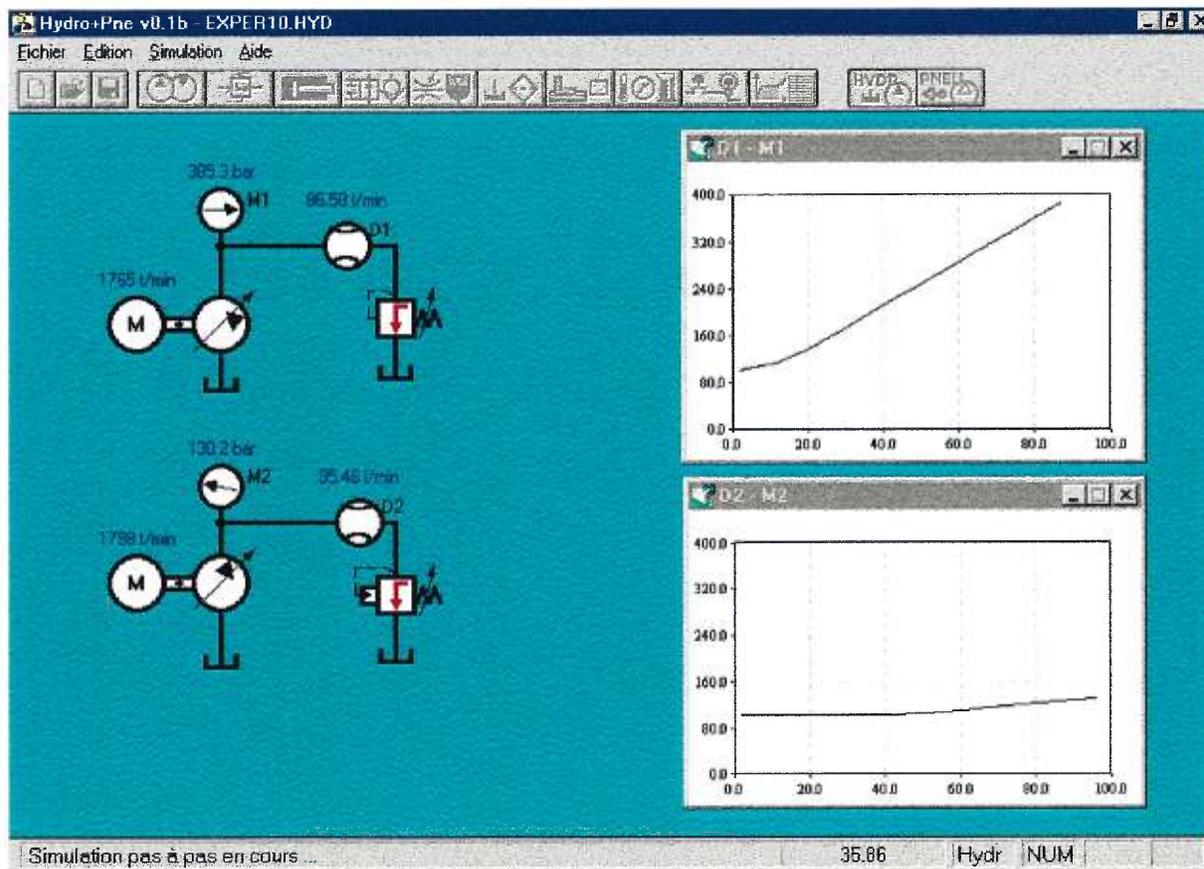
Observez l'effet sur le débit de la pompe. Si le rendement est assez faible, la totalité du débit est perdu dans les fuites internes ; dans ce cas, aucun débit utile n'est produit par la pompe et l'accumulateur ne se remplit plus.

Avec un rendement volumétrique de la pompe assez faible (environ 60 % et moins), cliquez sur le triangle blanc de l'accumulateur et amenez-le au remplissage maximal. Constatez qu'il se vide même si la pompe continue à tourner. L'huile de l'accumulateur se vide à travers les fuites de la pompe.

Modifiez aussi le débit nominal de la pompe et observez son incidence sur la vitesse de remplissage de l'accumulateur. Constatez que, lorsque le débit augmente, la puissance absorbée augmente proportionnellement, ce qui accroît le glissement du moteur électrique.

Exper 10

Titre : Saturation des limiteurs de pression d'action directe et pilotée



DESCRIPTION

Cette expérimentation consiste à étudier le phénomène de saturation des limiteurs de pression en fonction de leur débit nominal et du type de construction.

OBJECTIFS

Observer l'effet du débit sur la pression d'ouverture de deux limiteurs de pression, l'un d'action directe, l'autre d'action pilotée. Comparer le comportement de ces deux types de limiteurs de pression.

CONCEPTS MIS À CONTRIBUTION

Débit, saturation, pression d'ouverture, pression de plein débit.

SIMULATION : ÉTAPE I

CONFIGURATION

Cette expérimentation présente deux montages hydrauliques identiques sauf pour ce qui est des limiteurs de pression ; celui d'en haut est d'action directe, celui d'en bas d'action pilotée. Les pompes sont à cylindrée variable, ce qui permet de changer le débit en cours de simulation.

OBSERVATIONS

Au départ de la simulation, les pompes se placent en position de débit minimal (5 % du débit nominal). La pression est alors celle du réglage des limiteurs de pression car le débit qui y circule est très faible.

En cours de simulation, faites varier progressivement la cylindrée des pompes, en cliquant avec la souris sur la pointe de la flèche inclinée et en la déplaçant vers la droite par petits incréments. Les graphiques qui se construisent à chaque incrément illustrent la pression d'ouverture pour chaque valeur du débit. Observez que la pression à débit maximal du limiteur de pression d'action directe est très supérieure à celle du limiteur d'action pilotée. Ceci illustre le phénomène de saturation causé par la viscosité de l'huile.

De par sa construction, le limiteur de pression d'action directe agit sur un orifice de section relativement faible ; avec le plein débit, il se produit un grand frottement visqueux. Pour cette raison, ce type de limiteur est généralement limité à des débits assez faibles, de l'ordre de 25 l/min. Contrairement, le limiteur de pression d'action pilotée agit d'abord sur un petit orifice ; cette action est amplifiée ensuite sur un orifice de grande section, ce qui permet le passage d'un débit important, avec un faible frottement visqueux.

SIMULATION : ÉTAPE II

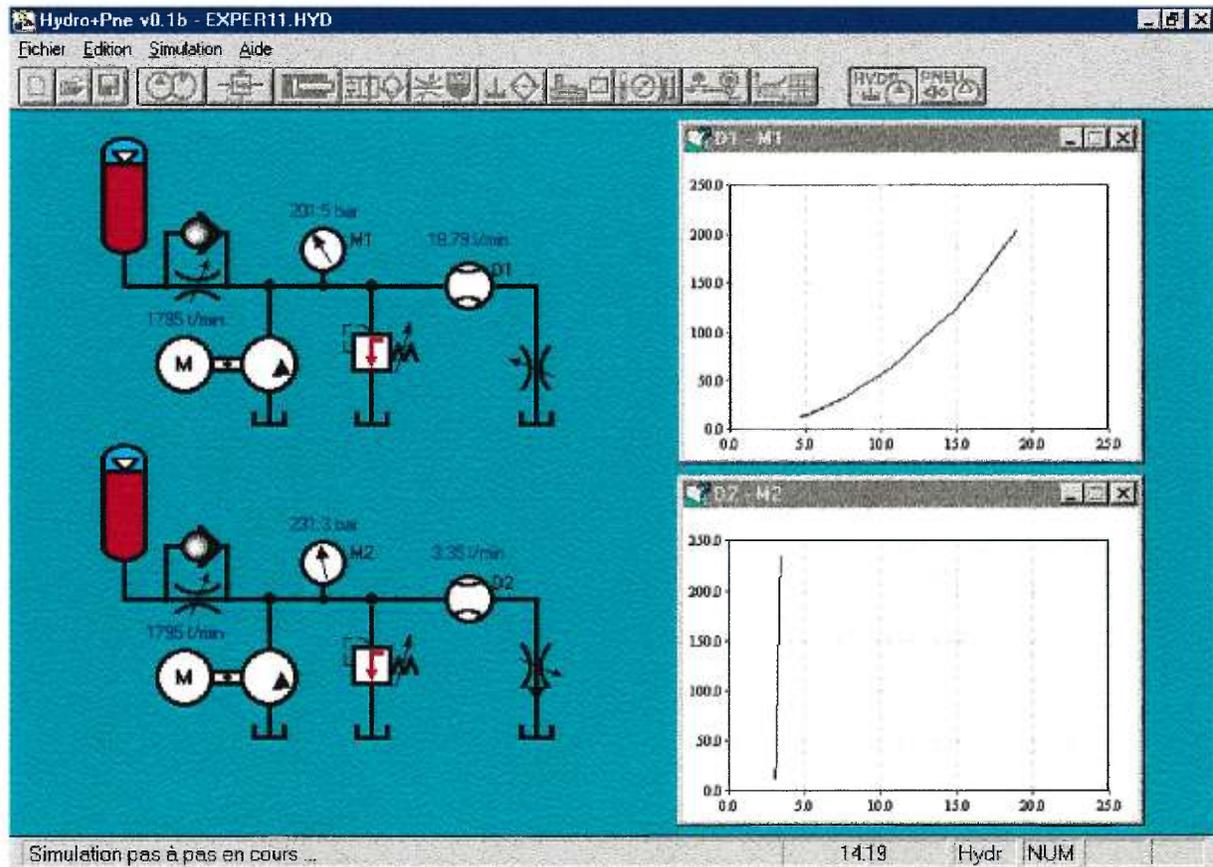
CONFIGURATION

Modifiez le débit des pompes et les pressions d'ouverture des limiteurs. Modifiez aussi le rendement volumétrique des pompes et le débit nominal du limiteur de pression d'action pilotée.

OBSERVATIONS

Comparez les différences obtenues dans les courbes de saturation des deux limiteurs de pression. Constatez notamment que les limiteurs de pression d'action pilotée peuvent accepter un débit très important avant que le phénomène de saturation ne se manifeste de manière significative.

Exper 11

Titre : Saturation des limiteurs et des régulateurs de débit

DESCRIPTION

Cette expérimentation consiste à étudier le lien qui existe entre la pression et le débit d'huile qui circule à travers une restriction.

OBJECTIFS

Expérimenter le comportement de deux types de composants destinés à régler le débit, soit le limiteur de débit (restriction simple) et le régulateur de débit (restriction avec compensateur de pression). Comparer leur capacité de maintenir un débit constant sous diverses conditions de pression.

CONCEPTS MIS À CONTRIBUTION

Pression, débit, saturation, compensateur de pression (balance).

CONFIGURATION

Cette expérimentation présente deux systèmes hydrauliques identiques, sauf pour ce qui est du limiteur de débit (en haut) et du régulateur de débit (en bas). Dans les deux cas, le débit de la pompe se répartit, à droite, vers le réservoir à travers le limiteur ou le régulateur de débit, et, à gauche, vers l'accumulateur.

OBSERVATIONS

Observez que, à mesure que l'accumulateur se remplit, la pression augmente, ce qui cause aussi une forte augmentation du débit qui circule par le limiteur de pression (système d'en haut). Par contre, l'augmentation de la pression n'affecte que très légèrement le débit qui circule par le régulateur de débit à pression compensée. Dans le premier cas, la pression correspond à une fonction quadratique du débit. Dans le deuxième cas, la pression est sensiblement indépendante du débit.

Ces différents comportements sont dus au fait que le limiteur de débit est essentiellement un simple étranglement de section réglable, alors que le régulateur de débit comporte une «balance de pression» ou compensateur interne qui maintient le différentiel de pression pratiquement constant en amont et en aval de l'étranglement. En d'autres mots, le compensateur prend en charge les variations de pression, de sorte qu'elles ne se manifestent pas au niveau de l'étranglement.

SIMULATION : ÉTAPE II

CONFIGURATION

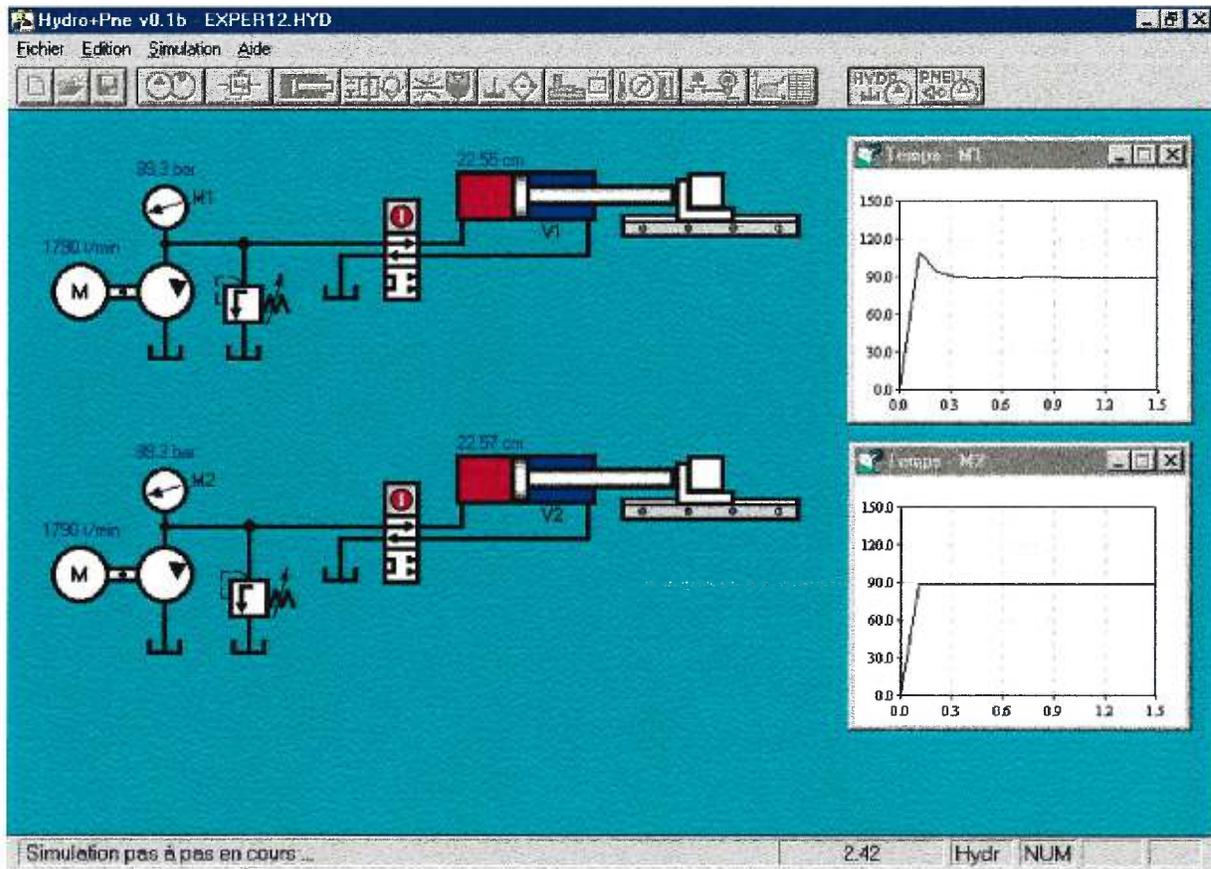
Modifiez le débit de la pompe et la section d'ouverture du limiteur et du régulateur de débit.

OBSERVATIONS

Observez dans quelle mesure chacun de ces changements affecte les courbes de débit des deux systèmes. Comparez les résultats avec ceux de la configuration de départ.

Exper 12

Titre : Effets des forces d'inertie et de frottement sec



DESCRIPTION

Cette expérimentation consiste à étudier l'effet de la masse sur le comportement d'un vérin durant le démarrage et à comparer cet effet à celui d'une force de frottement de grandeur équivalente.

OBJECTIFS

Observer l'effet de l'inertie d'une masse en accélération (loi de Newton : $F = m a$). Comparer l'effet d'inertie à celui d'une force de frottement de grandeur équivalente. Étudier l'effet combiné de ces deux phénomènes.

CONCEPTS MIS À CONTRIBUTION

Force due à l'inertie d'une masse, force de frottement statique et dynamique, accélération

SIMULATION : ÉTAPE I

CONFIGURATION

Cette expérimentation présente deux montages hydrauliques simples et identiques sauf pour ce qui est des charges des glissières. Dans la glissière du système d'en haut, il y a une masse mais aucune force de serrage du mécanisme. Inversement, dans la glissière du système d'en bas, il n'y a pas de masse mais plutôt une force de serrage du mécanisme de valeur équivalente. Autant la masse que la force de serrage du mécanisme se manifestent, au niveau du mouvement de la glissière, sous la forme d'une force de frottement de même importance. Notez que les coefficients de frottement statique et dynamique sont identiques.

OBSERVATIONS

Démarrez la simulation en pas-à-pas et activez les deux distributeurs. Observez que la courbe de pression du système d'en haut présente une montée assez importante, suivie d'une chute et d'une stabilisation après quelques oscillations.

Le phénomène est de courte durée mais de grande importance : il illustre la surpression qui permet de produire la force nécessaire pour accélérer la charge. Dès que la vitesse du vérin correspond à celle du débit de la pompe, la pression tombe et se stabilise à la valeur qui correspond à la force de frottement causée par le poids de la masse.

Dans le système d'en bas, le phénomène d'accélération ne se manifeste pas car la masse est nulle (situation théorique). La pression constante correspond à la force de frottement causée par la force de serrage du mécanisme de la glissière.

SIMULATION : ÉTAPE II

CONFIGURATION

Modifiez la valeur de la masse et de la force de serrage du mécanisme qui agissent sur les glissières. Modifiez aussi le débit de la pompe afin d'obtenir des vitesses, et donc des accélérations, du vérin différentes.

OBSERVATIONS

Observez que, durant l'accélération, lorsque la masse est assez grande, la pression dépasse celle du réglage du limiteur de pression ; celui-ci s'ouvre momentanément pour laisser passer l'excédent de débit. Cette situation est très fréquente dans les systèmes et il convient d'en minimiser la durée car, d'une part, elle consomme inutilement de l'énergie et génère de la chaleur et, d'autre part, elle impose à la pompe des surpressions potentiellement dommageables.

Constatez que la durée de l'accélération varie en fonction de la masse mais aussi de la vitesse finale du vérin, laquelle dépend du débit de la pompe.

SIMULATION : ÉTAPE III**CONFIGURATION**

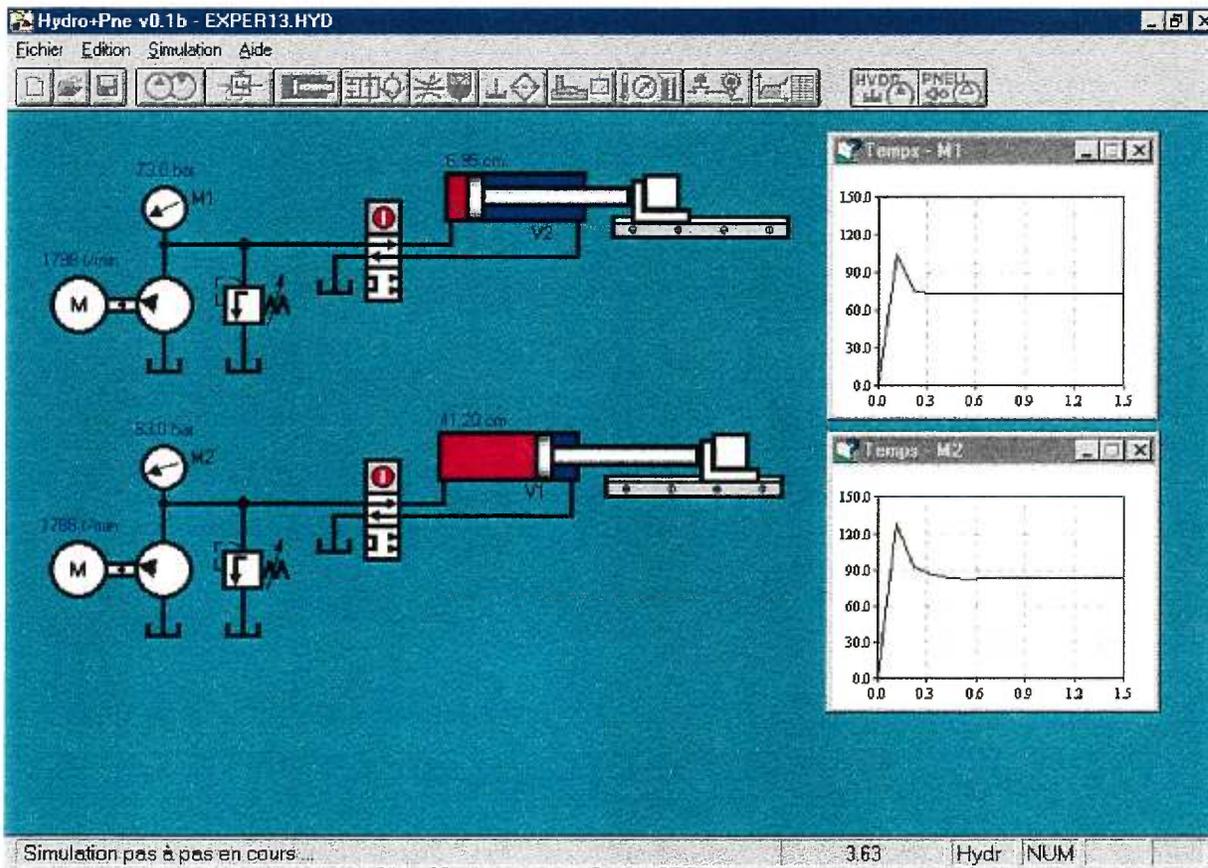
Modifiez la valeur des coefficients de frottement des glissières et combinez l'effet de la masse avec celui de la force de serrage du mécanisme.

OBSERVATIONS

Observez l'effet combiné des deux forces (inertie et frottement) sur la courbe de pression durant l'accélération.

Exper13

Titre : Effets des forces d'inertie, de frottement sec et de frottement visqueux



DESCRIPTION

Cette expérimentation est complémentaire de la précédente. Elle consiste à étudier l'effet combiné de l'inertie, du frottement sec et du frottement visqueux sur le comportement d'un vérin.

OBJECTIFS

Observer l'effet des trois types de force qui agissent sur un vérin, soit la force d'inertie due à l'accélération de la masse, la force de frottement sec due au mécanisme de la glissière et la force de frottement visqueux causée par le débit d'huile. Étudier l'effet combiné de ces forces.

CONCEPTS MIS À CONTRIBUTION

Inertie, accélération, frottement sec et visqueux, débit, pression, rendement volumétrique, énergie.

SIMULATION : ÉTAPE I**CONFIGURATION**

Cette expérimentation présente deux montages hydrauliques simples identiques à ceux de l'expérimentation précédente. Ici cependant, les glissières comportent une masse et une force de serrage du mécanisme. De plus, les vérins tiennent compte du phénomène des frottements visqueux. Les charges sont identiques dans les deux systèmes ; par contre, le débit de la pompe du système d'en bas est plus grand que celui d'en haut.

OBSERVATIONS

Démarrez la simulation en pas-à-pas et activez les deux distributeurs. Observez que la courbe de pression des deux systèmes est analogue. Cependant, celle d'en bas montre une montée de pression plus importante due débit plus grand de la pompe, ce qui se traduit par une vitesse finale du vérin plus importante. Cependant, cette surpression est aussi causée par la résistance qu'offre l'huile à son écoulement. Il s'agit donc d'un effet combiné de ces facteurs.

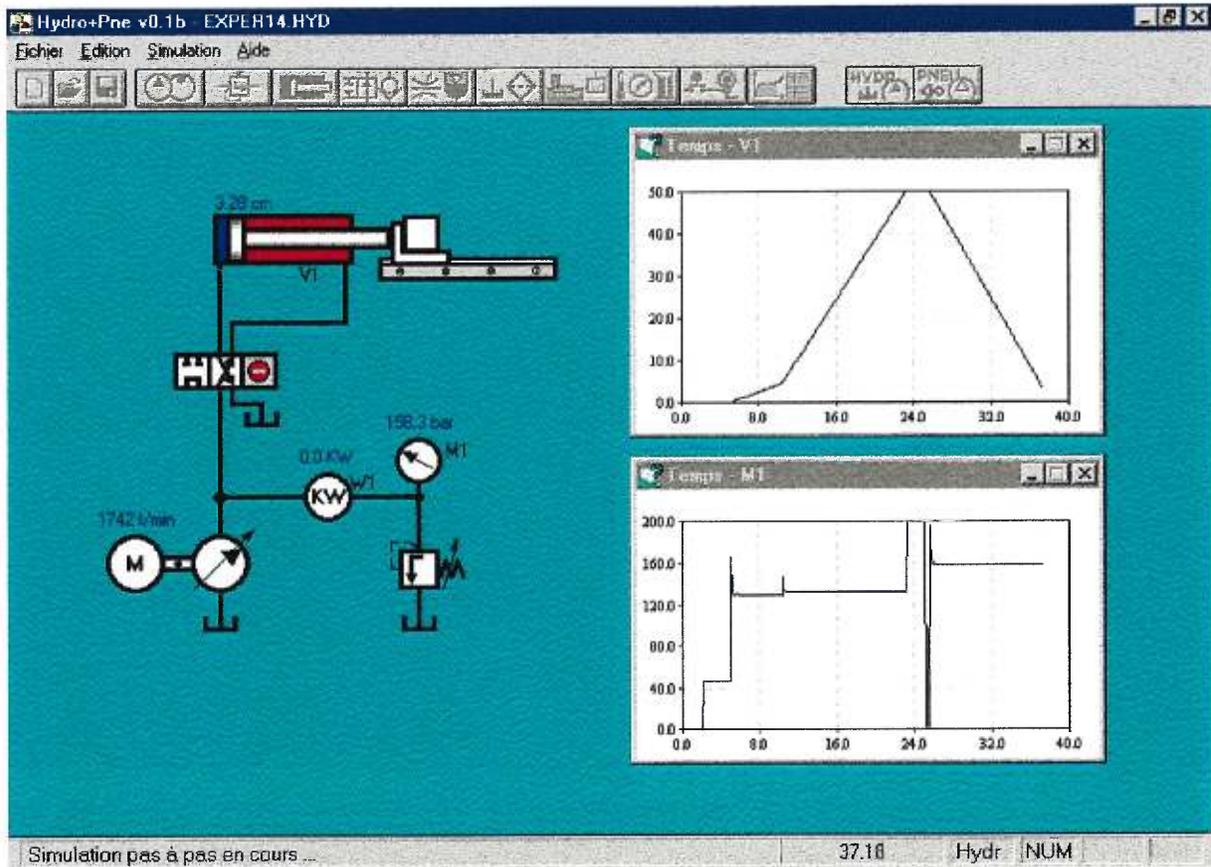
SIMULATION : ÉTAPE II**CONFIGURATION**

Modifiez, tour à tour, le débit des pompes ainsi que la masse et la force de serrage du mécanisme.

OBSERVATIONS

Constatez particulièrement l'effet du débit sur la pression à laquelle les systèmes se stabilisent lorsque la période d'accélération est terminée. Observez l'incidence de chacun des changements sur la courbe de pression.

Exper 14

Titre : Circuit linéaire simple avec pompe à cylindrée variable

DESCRIPTION

Cette expérimentation consiste à étudier le fonctionnement d'un système hydraulique complet.

OBJECTIFS

Étudier les interactions entre les composants durant un cycle complet du système. Étudier notamment l'effet du débit constant sur les vitesses de sortie et d'entrée du vérin. Étudier l'effet des fuites internes de la pompe, du glissement du moteur électrique, de la saturation du limiteur de pression et du frottement sec et visqueux sur le comportement général du système.

CONCEPTS MIS À CONTRIBUTION

Inertie, accélération, frottement sec et visqueux, débit, pression, rendement volumétrique, énergie, puissance, glissement d'un moteur électrique, saturation.

SIMULATION : ÉTAPE I**CONFIGURATION**

Cette expérimentation présente un montage hydraulique qui est à la fois simple et complet. Le débit de la pompe passe par le distributeur et active le vérin, lequel agit sur le mécanisme à glissière. Généralement, dans ce type de circuits, on utilise une pompe à cylindrée fixe. Ici, la présence de la pompe à cylindrée variable permet d'enrichir l'expérimentation.

OBSERVATIONS

Au départ de la simulation, la pompe se place en position de débit minimal (5 % du débit nominal). La pression est nulle car le débit retourne librement vers le réservoir. Lorsqu'on active le distributeur, la pression augmente mais la pompe ne produit aucun débit net ; en fait, son débit est complètement absorbé par ses propres fuites internes, ce qui explique que le vérin n'avance pas.

En cours de simulation, faites varier la cylindrée de la pompe, en cliquant avec la souris sur la pointe de la flèche inclinée et en la déplaçant vers la droite. Observez le graphique indiquant la vitesse du vérin ; constatez que, pour un débit donné, la vitesse et la pression pendant la sortie du vérin sont inférieures à celles d'entrée. Ceci est dû au fait que les surfaces actives du vérin sont différentes, celle du piston est plus grande que celle de la couronne.

SIMULATION : ÉTAPE II**CONFIGURATION**

Recommencez cette expérimentation et changez la cylindrée de la pompe lorsque le vérin se trouve vers la mi-course.

OBSERVATIONS

Observez que, si le débit augmente, la pression se stabilise à un niveau légèrement supérieur au précédent, et inversement. Ceci est causé par l'augmentation des frottements visqueux. La surpression transitoire produit la force supplémentaire qui est nécessaire pour accélérer la charge jusqu'à la nouvelle vitesse.

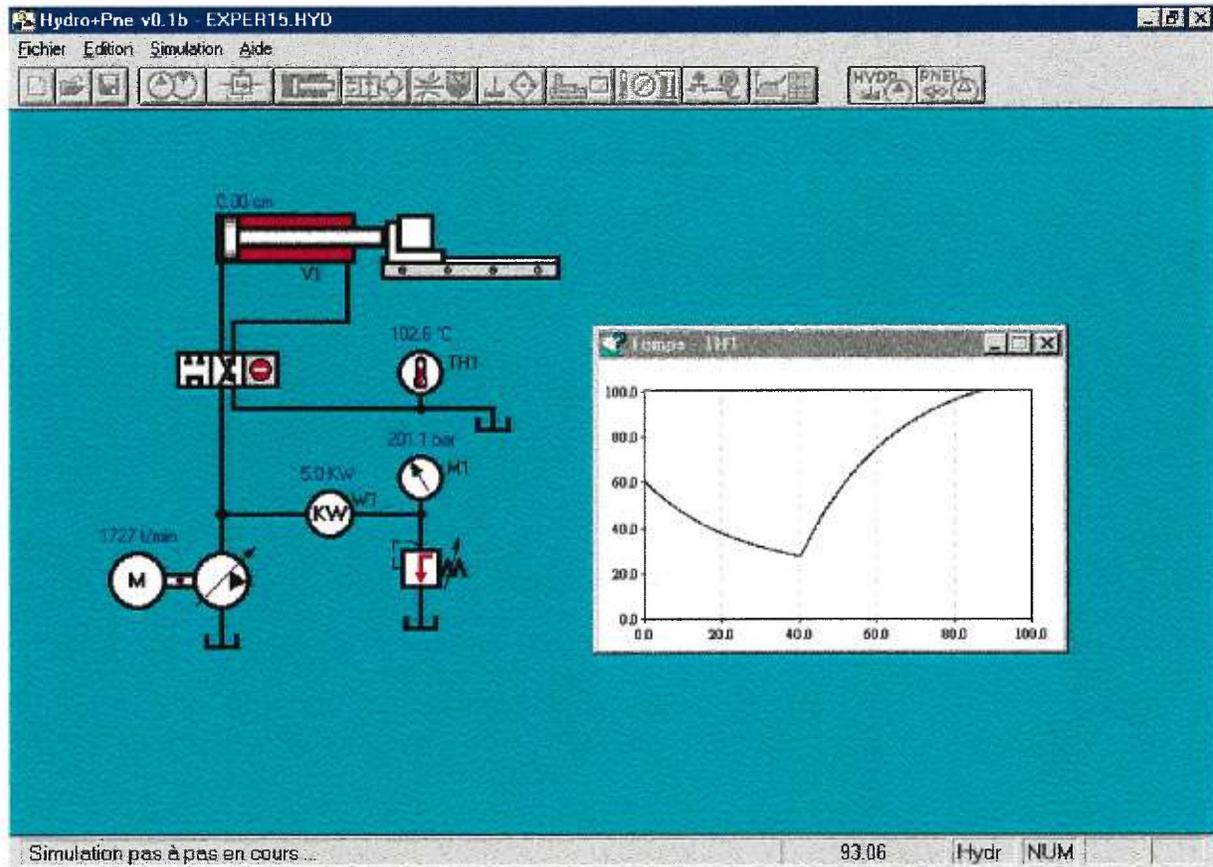
SIMULATION : ÉTAPE III**CONFIGURATION**

Augmentez puis diminuez le débit nominal de la pompe. Augmentez puis diminuez la masse et la force de serrage du mécanisme de la glissière.

OBSERVATIONS

Observez l'influence de chacun de ces paramètres sur la pression. Observez particulièrement leur effet durant les accélérations.

Exper 15

Titre : Équilibre thermique d'un système hydraulique

DESCRIPTION

Cette expérimentation est complémentaire de la précédente ; elle permet d'explorer plus à fond l'ensemble des phénomènes qui se produisent dans un système hydraulique complet, particulièrement les transformations énergétiques.

OBJECTIFS

Étudier le phénomène de la transformation de l'énergie en chaleur. Étudier les problèmes de surchauffe des systèmes hydrauliques et les solutions qui font appel à des échangeurs de chaleur. Étudier les paramètres qui influencent l'équilibre thermique d'un système.

CONCEPTS MIS À CONTRIBUTION

Énergie, transformations énergétiques, chaleur, puissance, dissipation thermique, masse thermique, chaleur spécifique, équilibre thermique.

SIMULATION : ÉTAPE I

CONFIGURATION

Ce circuit est identique à celui de l'expérimentation précédente. Ici, l'ajout d'un thermomètre permet d'observer l'évolution de la température du système. Précisons que cette température est considérée uniforme dans tout le système.

OBSERVATIONS

Au début de la simulation, la température est assez élevée et elle décroît rapidement puisqu'il n'y a pratiquement pas d'énergie mise en cause et que le réservoir se trouve dans un environnement froid. Constatez que la vitesse de refroidissement diminue progressivement ; la température atteint un point d'équilibre ; la courbe est asymptotique.

Recommencez la simulation et activez le distributeur. Constatez que la température décroît pendant que le vérin est en mouvement, cela même si la puissance impliquée (débit et pression) est importante. Cependant, lorsque le vérin arrive en fin de course et que le limiteur de pression dérive l'huile vers le réservoir, la température grimpe. Observez la puissance enregistrée par le wattmètre ; elle est entièrement transformée en chaleur, de manière analogue à celle d'une résistance électrique. Observez que la température monte rapidement et suit le même type de courbe que lors du refroidissement. Il y a aussi une température d'équilibre lorsque le système dissipe autant d'énergie qu'il en transforme en chaleur.

SIMULATION : ÉTAPE II

CONFIGURATION

Dans la boîte de dialogue du réservoir, changez tour à tour les paramètres suivants :

- la température de l'huile au départ
- la température ambiante
- le taux de dissipation de chaleur
- la surface de dissipation du réservoir
- le volume d'huile

OBSERVATIONS

Constatez que la vitesse de refroidissement varie en fonction directe du différentiel des températures, du taux de dissipation de chaleur et de la surface de dissipation du réservoir. Contrairement, la vitesse de refroidissement varie en fonction inverse du volume d'huile du réservoir.

Constatez, par ailleurs, que la température d'équilibre thermique est très élevée. Idéalement, elle ne devrait pas excéder 75 ° C.

Observez aussi que le volume d'huile du réservoir n'affecte pas les températures d'équilibre (froide et chaude). Il affecte seulement la vitesse de réchauffement et de refroidissement. En d'autres mots, le volume d'huile constitue une masse thermique qui implique une «inertie thermique», laquelle résiste aux changements de température, au même titre que l'inertie mécanique résiste aux changements de vitesse.

SIMULATION : ÉTAPE III

CONFIGURATION

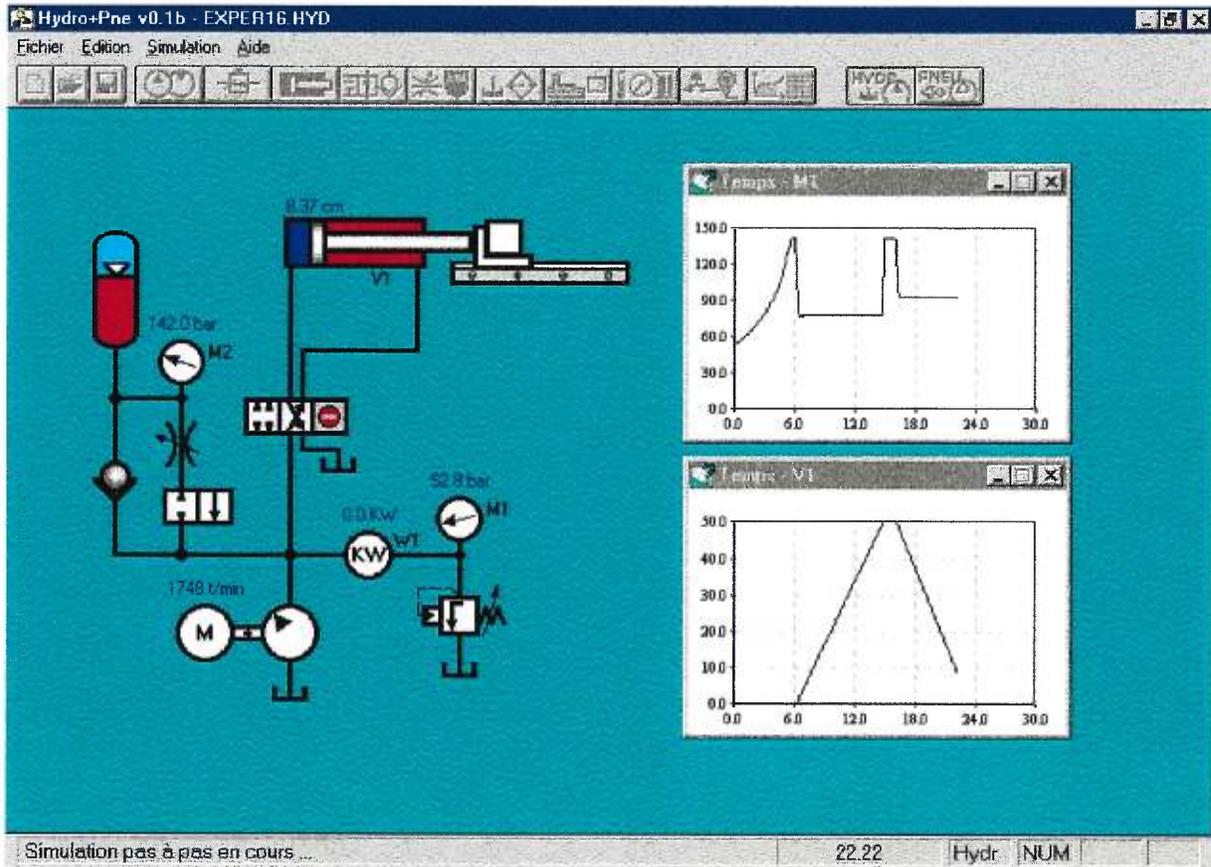
Ajoutez un refroidisseur dans le conduit qui relie le distributeur au réservoir. Dans sa boîte de dialogue, entrez la puissance qu'il doit dissiper et les températures de départ (maximale) et d'arrêt (minimale).

OBSERVATIONS

Constatez les résultats obtenus. Vérifiez si la température maximale d'équilibre du système est acceptable. Vérifiez si le refroidisseur dissipe une puissance adéquate dans les circonstances. Vérifiez aussi si les températures de marche et d'arrêt sont convenables.

Cherchez à déterminer la puissance minimale que doit dissiper le refroidisseur afin de maintenir la température du système en équilibre. Constatez que cette puissance ne correspond pas à celle affichée par le wattmètre. Ceci est dû au fait que le réservoir possède aussi une capacité importante de dissipation d'énergie. De plus, le wattmètre n'enregistre pas la chaleur produite par les pertes de rendement volumétrique et mécanique de la pompe, et par les joints d'étanchéité du piston du vérin.

Exper 16

Titre : Circuit avec réserve par accumulateur

DESCRIPTION

Cette expérimentation permet d'étudier un système hydraulique complet comportant une réserve d'énergie de sécurité.

OBJECTIFS

Étudier le comportement d'un système hydraulique avec un accumulateur qui permet de constituer une réserve d'énergie que l'on peut utiliser notamment en cas de panne électrique. Déterminer les niveaux pression fonctionnels et le volume d'huile en réserve nécessaire pour effectuer le travail voulu. Expérimenter le phénomène de la réversibilité des pompes sous l'effet des forces menantes. Déterminer les modifications à apporter au circuit afin qu'il remplisse adéquatement sa fonction.

CONCEPTS MIS À CONTRIBUTION

Pression de précharge, réversibilité des pompes, force menante.

SIMULATION : ÉTAPE I**CONFIGURATION**

Au départ de la simulation, la pompe remplit l'accumulateur et constitue ainsi une réserve d'huile sous pression. La charge de l'accumulateur est isolée du reste du circuit par le clapet antiretour et par le distributeur 2/2 en position normalement fermée. Le circuit peut être opéré normalement, indépendamment de la réserve.

Cliquez deux fois sur le moteur électrique pour l'arrêter et simuler une panne. Actionnez le distributeur qui donne accès à l'huile de l'accumulateur.

OBSERVATIONS

Constatez que l'huile de l'accumulateur ne s'est pas dirigé vers le vérin. Elle a plutôt emprunté la voie vers la pompe et elle l'a entraînée en rotation en sens inverse, avec le moteur électrique. Sous l'effet du débit de l'accumulateur, la pompe se comporte comme un moteur volumétrique, en raison de la réversibilité de son mécanisme.

SIMULATION : ÉTAPE II**CONFIGURATION**

Modifiez le circuit afin d'empêcher l'huile de circuler vers la pompe en ajoutant un clapet antiretour à la sortie de celle-ci.

OBSERVATIONS

Constatez que maintenant l'huile de l'accumulateur est disponible pour actionner le vérin.

Constatez, par ailleurs, que le volume disponible en réserve est insuffisant pour compléter la course du vérin. Aussi, les pressions ne sont pas adéquates. Cherchez à déterminer le volume de l'accumulateur et la pression du gaz de précharge qui permettront de compléter la course du vérin.