



Méthodes et outils d'aide à la conception des processus opérationnels des systèmes de formation

Olivier Bistorin

► To cite this version:

Olivier Bistorin. Méthodes et outils d'aide à la conception des processus opérationnels des systèmes de formation. Autre. Université Paul Verlaine - Metz, 2007. Français. NNT : 2007METZ036S . tel-01749013v1

HAL Id: tel-01749013

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01749013v1>

Submitted on 29 Mar 2018 (v1), last revised 18 Jun 2008 (v2)

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

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



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

ACADEMIE DE NANCY-METZ

Université Paul Verlaine de METZ

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ PAUL VERLAINE DE METZ

Spécialité : Automatique

Mention : Génie Industriel

École Doctorale : Informatique, Automatique, Électronique - Électrotechnique, Mathématiques

Présentée publiquement

Par

Olivier BISTORIN

Le 12 décembre 2007

Titre :

**Méthodes et outils d'aide à la conception des processus
opérationnels des systèmes de formation**

JURY :

Pr. Emmanuel CAILLAUD

Pr. Laurent GENESTE

Pr. Hervé PINGAUD

Pr. Pierre PADILLA

Dr. Thibaud MONTEIRO

Pr. Claude POURCEL

Université Louis Pasteur, Strasbourg

École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes

École des Mines d'Albi-Carmaux

École Nationale d'Ingénieurs de Metz

Université Paul Verlaine de Metz

Conseiller scientifique du LGIPM

Préparée au sein du LGIPM

Laboratoire de Génie Industriel et de Production Mécanique

*On fait la science avec des faits, comme on fait une maison
avec des pierres : mais une accumulation de faits n'est pas
plus une science qu'un tas de pierres n'est une maison*

Henri POINCARÉ

À mon père...

Remerciements

En premier lieu, je souhaite remercier Laurent GENESTE, professeur à l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes ainsi que Hervé PINGAUD, professeur à l'École des Mines d'Albi-Carmaux pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ces travaux de thèse et pour toutes les remarques constructives qu'ils ont pu émettre et qui m'ont permis d'envisager de nombreux axes de développements futurs par rapport aux travaux présentés dans ce mémoire.

J'adresse également mes remerciements à Emmanuel CAILLAUD, professeur à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg pour avoir participé au jury de thèse et avoir accepté d'en être le président.

Mes remerciements les plus sincères vont à mon directeur de Thèse, Pierre PADILLA, professeur à l'École Nationale d'Ingénieurs de Metz pour avoir su donner l'impulsion initiale à cette thèse et m'avoir permis de mener une véritable activité professionnelle en parallèle de mes travaux de recherche au sein de l'ENIM.

Un énorme merci également à mon co-directeur de thèse, Thibaud MONTEIRO, maître de conférences à l'Université Paul Verlaine de Metz pour m'avoir guidé et accompagné durant ces trois années et avoir su être exigeant lorsque c'était nécessaire.

Je souhaite également témoigner ma gratitude à Claude POURCEL, conseiller scientifique du LGIPM pour avoir soutenu avec ferveur mes travaux et pour m'avoir fait découvrir la communauté scientifique lors des différents GDR ou autres conférences effectués ensembles. Merci pour tout le travail qu'il a fourni depuis Sèvres.

Ayant eu l'occasion de travailler au sein de l'ENIM depuis septembre 2003, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont fait que ces années ont été pour moi excellentes et m'ont permis de prendre pied dans, peut être, mes futures fonctions de maître de conférences. Un merci tout particulier à l'ensemble des personnels du service des relations industrielles et internationales de l'ENIM : Marie Hélène, Latifa, Anne-Sophie, Virginie, Christian, Thierry,...

Merci également à ma mère pour m'avoir soutenu durant ces années et avoir cru en moi ; à mon père en espérant que de là où il est, il sera fier de son fils ; à Laurent, mon frère. Merci à toute ma famille pour sa présence.

Enfin, mille mercis à tous mes amis qui m'ont supporté et soutenu dans les moments heureux et malheureux : Audrey, Aurélie, Karine, Laura, Marie, Marie-Charlotte, Marianne, Muriel, Natoune, Les Bubus, Alex, Bertrand, CC, Dji, Jean-Mic', JP, Philou, Rémi, Raffaele, Raf, Seb, La Worst, la Warner, les Canards et autres pirates...

Merci à tous ceux que j'ai oubliés ici mais qui comptent pour moi, j'espère qu'ils ne m'en tiendront pas rigueur !....

Sans vous tous, tout ceci n'aurait pas été possible.....

Table des matières

Remerciements	5
Table des matières	7
0. Introduction	9
1. Contexte – Problématique.....	11
A. Contexte et bilan des systèmes de formation français et internationaux.....	11
A. I. Les systèmes de formation.....	11
a) Les systèmes de formation scolaires / professionnels.....	11
b) Systèmes de formation publics / privés.....	14
c) Ressources financières	14
d) Ressources humaines / techniques	16
A. II. Situation des systèmes de formation français	18
a) Structure du système d'éducation français.....	18
b) Ressources financières	20
c) Ressources Humaines.....	22
d) Ressources Techniques	23
e) Fonctionnement général et constats	25
A. III. Situation des systèmes de formation européens et mondiaux	28
a) Structures des systèmes éducatifs internationaux	28
b) Ressources financières	29
c) Ressources Humaines.....	31
d) Ressources Techniques	32
e) Fonctionnements généraux, constats.....	32
B. Présentation de l'ingénierie des systèmes de formation	35
B. I. L'ingénierie système.....	35
a) Définition de l'ingénierie	35
b) Définition de l'ingénierie système	36
c) Typologie des projets d'ingénierie	38
B. II. Spécificités de l'ingénierie des systèmes de formation	38
a) Analogies des systèmes de formation avec les systèmes de production de biens et de services.	38
b) Identification des clients des systèmes de formation	39
c) Identification de la stratégie des systèmes de formation.....	40
C. État de l'Art des travaux sur le processus de formation.....	42
C. I. Spécification – Conception.....	42
a) Formalisation de la demande : référentiels de compétences ou métiers	42
b) Profil des apprenants entrants	44
c) Construction du curriculum de formation	45
C. II. Réalisation.....	45
a) Les problèmes de timetabling	46
b) Complexité des systèmes de formation dans le cadre du timetabling.....	47
c) De nombreuses méthodes utilisées pour la résolution des problèmes de timetabling dans les systèmes de formation.....	48
D. Notre problématique.....	49
D. I. Objectifs généraux.....	49
D. II. Démarche envisagée	50
2. Modèle – Démarche	51
A. Modélisation du système de formation	51

A. I.	<i>État de l'Art sur la modélisation d'Entreprise, de systèmes de formation</i>	52
A. II.	<i>Modélisation MECI</i>	53
A. III.	<i>Modélisation UML</i>	56
B.	<i>Démarche de conception des formations – Génération de gammes de formation</i>	60
B. I.	<i>Création du catalogue de formation</i>	60
a)	<i>Approche orientée services</i>	60
b)	<i>Référentiels de compétences terminales</i>	62
B. II.	<i>Définition du parcours apprenant</i>	63
a)	<i>Formalisation des référentiels de compétences des apprenants entrants</i>	63
b)	<i>Identification des précédences entre compétences</i>	64
c)	<i>Conception de la gamme de formation</i>	65
d)	<i>Problématique de la simulation des parcours élèves</i>	68
e)	<i>Notre approche pour la simulation des parcours élèves</i>	69
f)	<i>Exemple pour la simulation des parcours apprenant</i>	74
C.	<i>Démarche de mise en œuvre des formations – planification et ordonnancement</i>	76
C. I.	<i>Planification des formations</i>	76
a)	<i>Spécification des éléments de formation</i>	77
b)	<i>Outils pour la planification</i>	78
c)	<i>Cohérence du système et capacité de charges des ressources</i>	80
C. II.	<i>Ordonnancement des formations</i>	82
a)	<i>Identification des contraintes</i>	83
b)	<i>Classement des contraintes et priorisation</i>	87
c)	<i>Formalisation mathématique des contraintes</i>	87
d)	<i>Définition de la fonction objective</i>	97
e)	<i>Approche pour la résolution du problème sous contraintes</i>	98
3.	<i>Application</i>	101
A.	<i>Présentation du cas de la Licence Professionnelle GPI</i>	101
B.	<i>Identification de l'offre Licence Professionnelle</i>	101
C.	<i>Génération du parcours apprenant</i>	102
D.	<i>Planification de la Licence Professionnelle</i>	104
E.	<i>Génération du modèle mathématique</i>	106
4.	<i>Conclusions et Perspectives</i>	111
A.	<i>Bilan de nos travaux</i>	111
B.	<i>Apports scientifiques</i>	112
C.	<i>Perspectives de développement</i>	113
5.	<i>Bibliographie</i>	115
	<i>Liste des figures</i>	121
	<i>Liste des tableaux</i>	123
	<i>Annexes</i>	125

0. Introduction

Depuis bien longtemps, l'humanité a compris que le progrès était lié à la capacité de remise en cause de ce qui semblait acquis, chercher d'autres façons de faire, comment faire mieux...différemment. L'ouverture et l'interconnectivité entre les peuples de la terre ont évidemment amplifié ce phénomène et c'est à pas de géant que nos sociétés connaissent des évolutions considérables. La recherche scientifique contribue activement à ces avancées en créant et mettant à disposition de la connaissance. Selon l'OCDE¹, le niveau de vie global de la population humaine a progressé autant ces dix dernières années qu'il ne l'avait fait durant les trente années précédentes. Bien sûr, la récente émergence de certains pays tels l'Inde ou la Chine y contribue activement. Toutefois, les pays développés ne sont pas en reste puisque toujours selon l'OCDE, le PIB par habitant des pays développés a, en moyenne, été multiplié par 10 au cours des 35 dernières années (statistiques 1970-2005).

Toutefois, ce développement effréné a eu quelques conséquences qu'il faut intégrer. Plus l'homme se facilitait la vie à travers le progrès, plus il se la compliquait en condamnant ses enfants à 10 voire 15 ans d'études pour comprendre le monde qui les entoure et pouvoir y évoluer sereinement. Il ne faut évidemment pas s'y tromper car c'est effectivement là le rôle principal de l'éducation : apprendre à vivre dans la société.

Alors que la plupart des secteurs industriels ont su s'adapter aux évolutions de nos sociétés, nous constaterons à travers le premier chapitre de ce mémoire que malheureusement, les secteurs de l'éducation, nationale comme internationale, n'ont pas su franchir le pas. Les insuffisances constatées à ce jour sont malheureusement nombreuses et il est important de s'en préoccuper dès maintenant avant que le système ne s'enraye.

Cependant, il est important de préciser que nos travaux portent sur les processus de formation et non sur les procédés. En effet, tout un pan de la recherche scientifique, constitué par les sciences de l'éducation, mène depuis de nombreuses années des réflexions sur les mécanismes d'apprentissage, d'évaluation des élèves, *etc.* Les résultats dans ce domaine sont tout à fait pertinents. Malheureusement, de nombreuses questions légitimes restent en suspend quant aux processus de l'éducation. L'organisation de ces systèmes de formation est bien assez complexe pour mériter que l'on s'y attarde. Ces travaux de thèse cherchent à rationaliser la conception des systèmes d'éducation et plus spécifiquement leur partie opérationnelle : celle qui forme.

Afin de bien comprendre le fonctionnement des systèmes de formation, nous nous attardons dans un premier temps sur la modélisation de ce système dans son ensemble. Nous nous focalisons par la suite sur une modélisation plus détaillée du processus opérationnel de formation en tant que tel afin de définir l'exact périmètre de nos travaux.

Nous présentons alors les méthodes et outils que nous proposons pour l'aide à la conception de ces processus opérationnels des systèmes de formation.

Enfin, dans un troisième chapitre, autour d'un cas applicatif, nous démontrons la pertinence des travaux développés et comment ceux-ci peuvent s'inclure de façon très concrète dans la refonte des systèmes de formation.

Pour conclure, nous synthétisons nos travaux autour de quelques grands axes en mettant en avant l'apport scientifique de ceux-ci puis nous précisons quelles en sont les diverses perspectives.

¹ OCDE : Organisation de Coopération et de développement Économique. L'OCDE regroupe les gouvernements de 30 pays attachés aux principes de la démocratie et de l'économie de marché en vue de soutenir une croissance économique durable, développer l'emploi, élever le niveau de vie, maintenir la stabilité financière, aider les autres pays à développer leur économie et enfin, contribuer à la croissance du commerce mondial

1. Contexte – Problématique

Dans ce chapitre, nous présentons un bilan exhaustif sur les systèmes de formation tant au niveau national qu'international. Ce bilan, certes peu élogieux sur certains aspects, ouvre la voie à l'introduction du concept d'ingénierie des systèmes de formation et la cruelle nécessité de son usage. Nous montrons dans cette partie en quoi l'ingénierie des systèmes pose les bases du concept d'ingénierie de formation. Le périmètre des travaux présentés dans ce mémoire se restreignant aux processus opérationnels du système de formation, nous présentons un bref état de l'art des travaux existants à ce sujet. Enfin, nous positionnons notre contribution face à ces travaux et précisons en quoi les réponses apportées face à cette problématique revêtent un véritable apport scientifique dans un environnement massivement inexploré.

A. Contexte et bilan des systèmes de formation français et internationaux

Les systèmes d'éducation ou de formation de part le monde sont assez homogènes. Bien sûr, des spécificités interviennent entre les différentes nations mais un tronc commun existe, par exemple au niveau des cycles de formation (primaire, secondaire, supérieur ou tertiaire). Dans une première partie, nous présentons les caractéristiques communes aux systèmes de formation et rapidement ce qui les caractérise. Par la suite, nous nous focalisons sur les choix de la France en termes d'éducation et les résultats des politiques menées depuis plus de vingt ans. Enfin nous abordons le problème sur un axe plus global en décrivant la situation au niveau international en établissant bien évidemment des comparaisons objectives avec le bilan de l'Éducation Nationale Française. C'est cet ensemble de constats autour d'indicateurs objectifs qui nous permet de justifier l'impérieuse nécessité de rénover les systèmes d'éducation pour les rendre à nouveau cohérents avec les sociétés qui les nécessitent. Cela fait appel à l'usage d'une vue peu commune au sein de tels systèmes : celle de l'ingénierie des systèmes de formation.

A. I. Les systèmes de formation

Nous considérons comme système de formation tout système dont au moins une des finalités est l'augmentation du niveau de compétences de l'apprenant faisant usage des services proposés par ce système. Dans cette optique, un système de formation pourra également être désigné comme système de production de compétences [CLEMENTZ C., 2000]. Plusieurs caractéristiques que nous présentons dans ce paragraphe nous permettent de mieux positionner le système de formation évoqué en fonction de sa structure et de son environnement.

a) Les systèmes de formation scolaires / professionnels

Nous distinguons deux types de systèmes de formation bien distincts dans leur finalité : les systèmes de formation scolaires et les systèmes de formation professionnels.

Les systèmes de formation scolaires sont des systèmes dont la finalité est de favoriser l'épanouissement de l'enfant, lui permettre d'acquérir une culture, le préparer à sa vie professionnelle et à l'exercice de ses responsabilités d'homme et de citoyen. On retrouve ces grandes volontés dans de nombreux codes de l'Éducation de différentes nations (ex : Article L-123 du code de l'Éducation

Nationale faisant état des missions de l'enseignement public français). La plupart des nations ont constaté que, disposer d'un système de formation scolaire, c'est favoriser le développement de ladite nation. En effet, la croissance économique manifestée par l'augmentation du PIB est en grande partie liée au taux d'emploi (nombre de personnes qui travaillent / nombre de personnes en âge de travailler) comme le démontre la Figure 1. On constate grâce au Tableau 1 que ce taux d'emploi est quant à lui, corrélé au niveau atteint dans l'enseignement scolaire par la population.

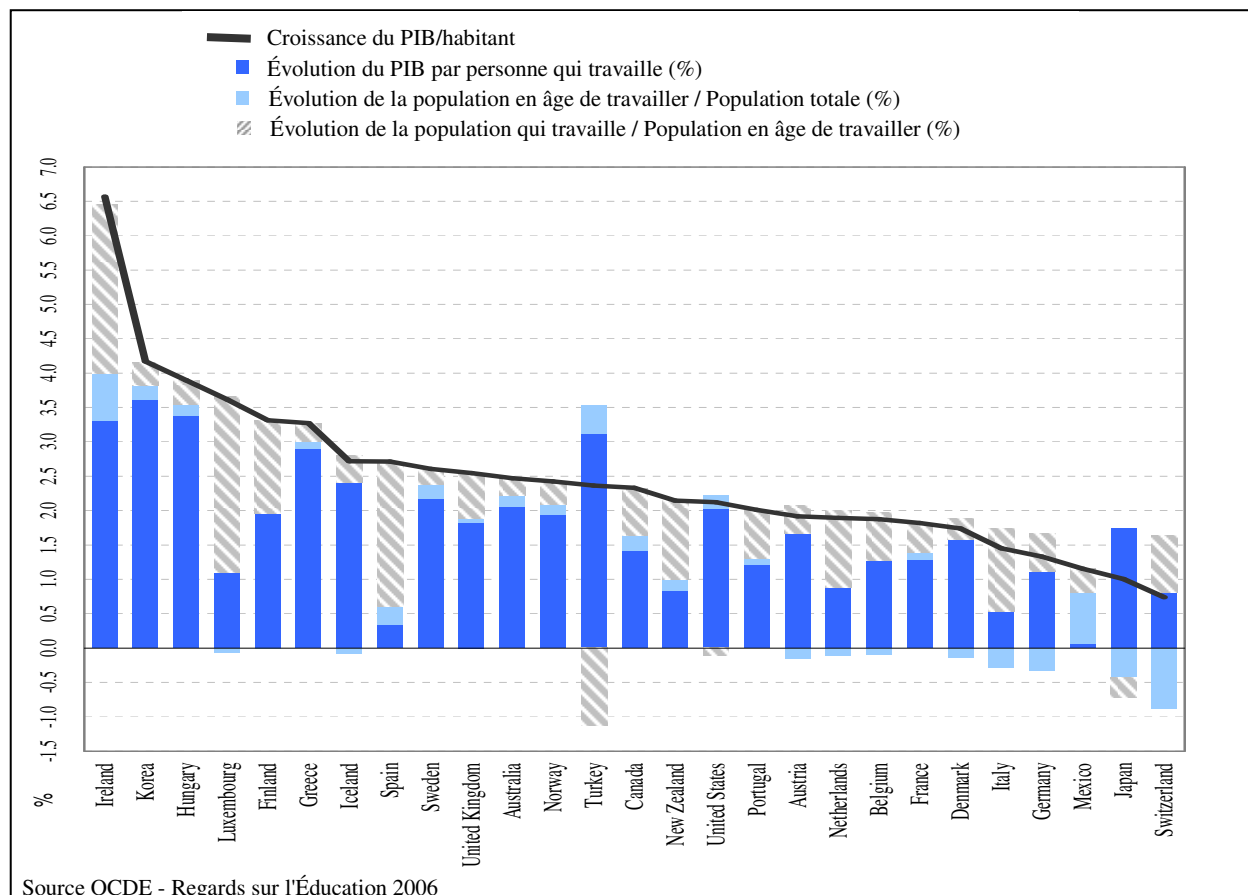


Figure 1. Éléments moteurs de la croissance du PIB (1994-2004)

	Pré-primaire et primaire	Premier cycle du secondaire	Deuxième cycle du secondaire	Tertiaire		Tous niveaux de formation confondus
				Type B	Type A et programmes de recherche	
France	50	67	75	85	80	71
Allemagne	38	50	54	81	84	69
Italie	32	63	74	80	83	63
Luxembourg	60	55	71	80	85	70
Espagne	48	67	73	81	82	67
Royaume-Uni	x(2)	54	85	87	89	79
États-Unis	55	58	73	79	83	74
Moyenne de l'OCDE	47	61	73	82	85	72
Moyenne de l'UE-19	42	57	73	82	85	71

Source OCDE - Regards sur l'Éducation 2006

Tableau 1. Taux d'emploi selon le niveau de formation (2004)

Par ailleurs, les nations ont tout intérêt à investir massivement dans l'éducation car le Taux de Rendement Interne social (TRI²) qui lui est lié est positif comme le montre le Tableau 2.

	TRI à l'obtention d'un diplôme correspondant au niveau d'enseignement secondaire		TRI à l'obtention d'un diplôme correspondant au niveau d'enseignement supérieur	
	Hommes %	Femmes %	Hommes %	Femmes %
Belgique	11,3	9,2	12,2	17,9
Danemark	14	12	7,8	7
Finlande	10	7	13,6	11
Hongrie	7,6	8,2	18,8	13,1
Corée	6,7	3,2	14,2	16,8
Nouvelle-Zélande	8,3	5,4	9,9	9,9
Norvège	8	5	9,5	10
Suède	13	10	7,5	6
Suisse	1,9	3,2	6,3	5,8
Royaume-Uni	13,8	11,1	13,7	16,1
États-Unis	13	10	14,1	13
Source OCDE - Regards sur l'Education 2006				

Tableau 2. Taux de Rendement Interne social lié à l'obtention d'un diplôme scolaire (2003)

Les systèmes de formation scolaires se divisent en quatre cycles distincts que sont l'enseignement préprimaire, l'enseignement primaire, l'enseignement secondaire et enfin l'enseignement tertiaire ou supérieur. En 1997, l'OCDE a mis en place la classification CITE [OCDE, 1999] permettant de segmenter les systèmes de formation scolaires. Cette classification est représentée à l'Annexe 1.

L'enseignement scolaire est, dans une grande majorité des nations, obligatoire mais pas nécessairement jusqu'au même niveau CITE. De plus, dans certains pays dont la France, l'obligation de suivre un enseignement scolaire est conditionnée par l'âge de la personne et non par le niveau scolaire atteint.

Enfin, on peut constater que ces quatre cycles sont fournisseurs les uns des autres et de façon séquentielle avec pour sortie logique le monde de l'emploi. Dans le cadre de la formation scolaire, la spécification des compétences à posséder devrait donc être réalisée par deux entités extérieures : le marché de l'emploi en ce qui concerne la spécification des compétences professionnelles attendues et la société pour ce qui concerne les compétences de vie en société et les savoirs-être.

Les systèmes de formation professionnels sont des systèmes de formation à destination d'un public déjà pleinement inséré dans la société et en situation d'exercice professionnel. C'est notamment le cas de la formation continue des adultes ou encore des sessions de formation organisées par des organismes

² TRI : Taux de Rendement Interne social : Le Taux de Rendement Interne social mesure le rendement, dans le temps, par rapport aux coûts de l'investissement initial relatif à l'éducation. Plus spécifiquement, le taux de rendement interne social désigne le taux d'actualisation qui égalise les coûts pour la société et les avantages pour la société de l'investissement dans l'éducation. Le coût social inclut le coût que peut représenter l'éventualité que certains ne participent pas à la production de bénéfices et le coût intégral de la formation assurée. Le bénéfice social inclut le gain de productivité associé à l'investissement dans l'éducation et tout un éventail d'avantages non économiques possibles tels que la baisse de la délinquance, l'amélioration de la santé, le renforcement de la cohésion sociale et le développement de la participation citoyenne.

indépendants pour l'acquisition de compétences très spécifiques à l'environnement professionnel (formation en bureautique, formation au coaching, *etc.*). La formation professionnelle n'est pas obligatoire et son usage est épisodique à partir d'un besoin exprimé clair. Elle s'inscrit pleinement dans le cadre de la formation tout au long de la vie, concept relativement récent permettant à chacun de prolonger le développement de ses compétences à l'aide de structures adaptées.

b) Systèmes de formation publics / privés

Les systèmes de formation connus, qu'ils soient scolaires ou professionnels, sont divisés en deux catégories selon le mode de gouvernance de l'établissement auquel ils appartiennent:

Un **établissement d'enseignement est dit « public »** s'il relève directement d'une autorité ou d'une administration publique qui en assure la direction ou s'il est dirigé et géré soit directement par un organisme public, soit par un organe (conseil, comité, *etc.*) dont la plupart des membres sont soit nommés par une autorité publique, soit élus par le public.

Un **établissement d'enseignement est dit « privé »** si sa direction relève d'une entité non gouvernementale (église, syndicat, entreprise, *etc.*) ou si son conseil d'administration se compose pour l'essentiel de membres qui n'ont pas été nommés par une autorité publique.

Les établissements d'enseignement publics, par leur nature, sont soumis aux réglementations nationales figées par les organismes de tutelle (ministères, commissions nationales, *etc.*). En revanche la situation des établissements d'enseignement privés est plus hétérogène. Dans certains pays, ils sont tenus d'être rattachés à un organisme de tutelle afin de respecter les standards nationaux et ainsi être autorisés à accueillir du public. C'est le cas en France pour tout ce qui concerne les cycles de l'enseignement obligatoire. En revanche, dans d'autres pays, les établissements d'enseignement privés sont totalement libérés et exonérés de tout référentiel à respecter. Ils sont parfois le siège d'expérimentations pédagogiques qui seront plus tard, reprises par les référentiels nationaux.

La plus grande majorité des systèmes de formation professionnels dépendent d'établissements d'enseignement privés.

c) Ressources financières

Les ressources financières des systèmes de formation sont très différentes en fonction de leurs caractéristiques, selon qu'ils soient scolaires ou professionnels et selon qu'ils dépendent d'établissements publics ou privés. En ce qui concerne les systèmes de formation dépendant d'établissements d'enseignement privés, les ressources financières les plus importantes proviennent de leurs clients qui ne sont autres que les apprenants bénéficiaires du service de formation. L'autre part provient généralement de l'organisme propriétaire (église, syndicat, *etc.*). Lorsque les établissements privés sont soumis à la tutelle des organisations d'État, elles perçoivent à ce titre des ressources financières dans la plupart des cas.

En ce qui concerne les systèmes de formation appartenant à des établissements d'enseignement publics, les ressources financières proviennent pour grande partie de l'organisme public dont ils dépendent. Dans la plupart des cas, ces financements proviennent directement de l'État mais ils peuvent également provenir des collectivités territoriales publiques en charge de l'enseignement à un

niveau local. C'est notamment le cas en France pour les établissements publics de l'enseignement primaire par exemple.

La Figure 2 indique le pourcentage du PIB par pays consacré à l'enseignement scolaire. Ce pourcentage montre l'importance du budget consacré à l'éducation dans les pays de l'OCDE.

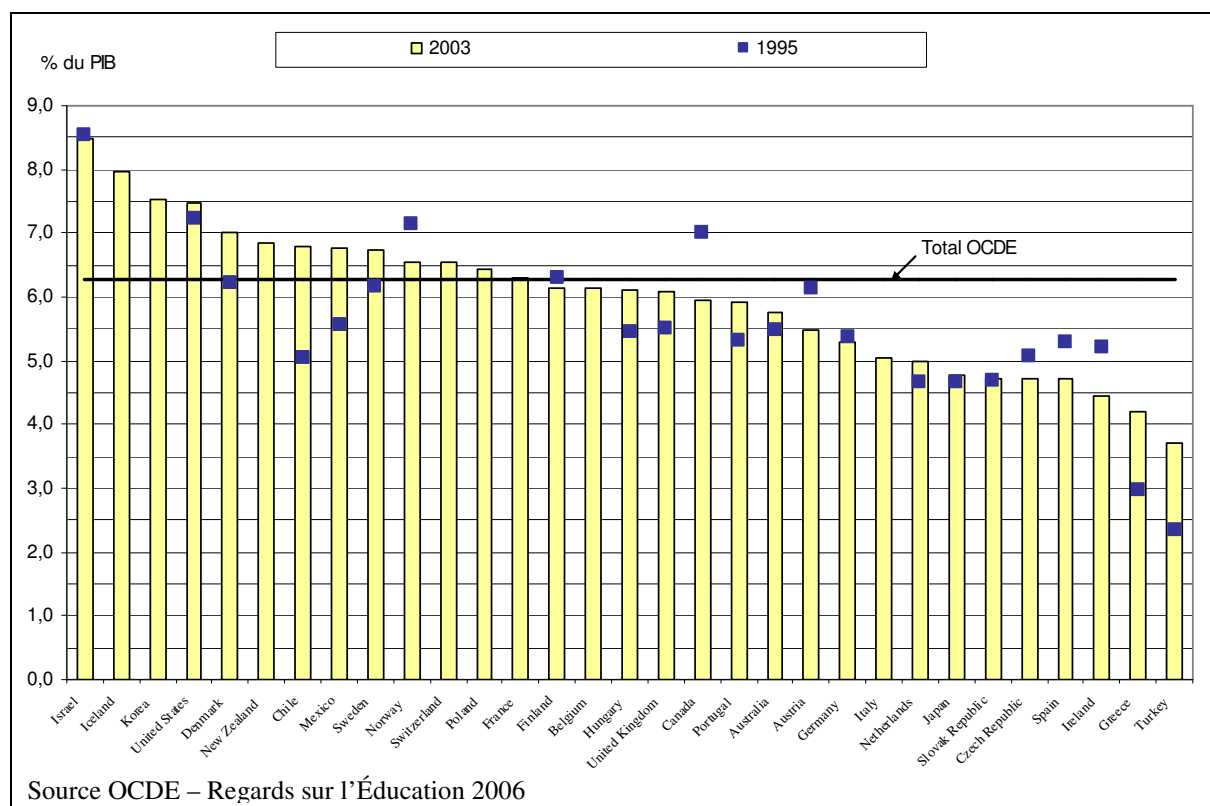


Figure 2. Dépenses au titre des établissements d'enseignement en pourcentage du PIB (1995-2003)

En outre, le Tableau 3 permet de constater que dans le cadre des systèmes de formation scolaires, la part des ressources financières privées est très limitée par rapport aux ressources financières publiques. Ainsi, dans les pays de l'OCDE, l'enseignement scolaire est, en moyenne, financé à 88% par les organisations publiques.

	Primaire, secondaire et post-secondaire non tertiaire			Tertiaire		
	Dépenses publiques	Dépenses privées	Total	Dépenses publiques	Dépenses privées	Total
France	4,0	0,3	4,2	1,1	0,2	1,4
Allemagne	2,9	0,6	3,5	1,0	0,1	1,1
Italie	3,5	0,1	3,6	0,7	0,2	0,9
Luxembourg	4,0	-	-	-	-	-
Espagne	2,8	0,2	3,0	0,9	0,3	1,2
Royaume-Uni	4,0	0,6	4,6	0,8	0,3	1,1
États-Unis	3,9	0,3	4,2	1,2	1,6	2,9
Moyenne de l'OCDE	3,6	0,3	3,9	1,1	0,4	1,4
Moyenne de l'UE-19	3,6	0,2	3,7	1,1	0,2	1,3

Source OCDE - Regards sur l'éducation 2006

Tableau 3. Répartition des dépenses publiques/privées pour l'éducation scolaire en pourcentage du PIB

Toujours selon l'OCDE, sur les 12% de financements privés, on constate que 9,3% ont pour origine les ménages et donc les apprenants, alors que seulement 3,7% restent assumés par des organisations privées extérieures.

d) Ressources humaines / techniques

Là encore, nous nous devons de distinguer plusieurs cas. Les établissements d'enseignement privés ont acquis de par leur statut une grande autonomie quant à l'acquisition, au maintien et à la libération de leurs ressources humaines et techniques. Nous aurons l'occasion d'y revenir mais cette liberté a des conséquences très positives sur l'efficacité globale des systèmes de formation. En revanche, cette autonomie a un coût et il est généralement assumé par les clients du système de formation dépendant d'un établissement privé. En ce qui concerne les établissements d'enseignement publics, ils sont soumis au respect de normes tant concernant les ressources humaines que les ressources techniques. Cependant, on observe une réelle différence entre les pays développés et les pays en voie de développement concernant certains aspects. C'est le cas notamment concernant la spécification des compétences des ressources humaines. Dans la plupart des pays développés, les emplois liés à l'éducation (enseignant, agent technique, agent administratif, *etc.*) sont soumis à un référentiel de compétences défini soit par concours, soit sur titre. C'est le cas en France avec les concours CAPE, CAPES, CAPET, *etc.*, la « qualification » pour les enseignants-chercheurs ou encore les concours de la fonction publique catégories A, B et C pour les agents techniques et administratifs. En revanche, dans les pays en voie de développement, on constate dans de nombreux cas que les emplois liés à l'éducation ne sont pas assujettis à qualification particulière ce qui constitue un réel frein à l'efficacité de ces systèmes. En ce qui concerne les ressources techniques, il faut distinguer les dépenses en capital des dépenses de fonctionnement.

Les dépenses en capital représentent la valeur du capital éducatif acquis ou créé pendant l'année visée – c'est-à-dire la formation de capital –, que ces dépenses soient financées à partir des recettes courantes ou par un emprunt. Les dépenses en capital comprennent la construction, la rénovation et les grosses réparations des bâtiments, ainsi que l'acquisition ou le remplacement d'équipements. Bien que l'investissement en capital requière une importante mise de fonds, les locaux et les équipements ont une durée de vie de plusieurs années.

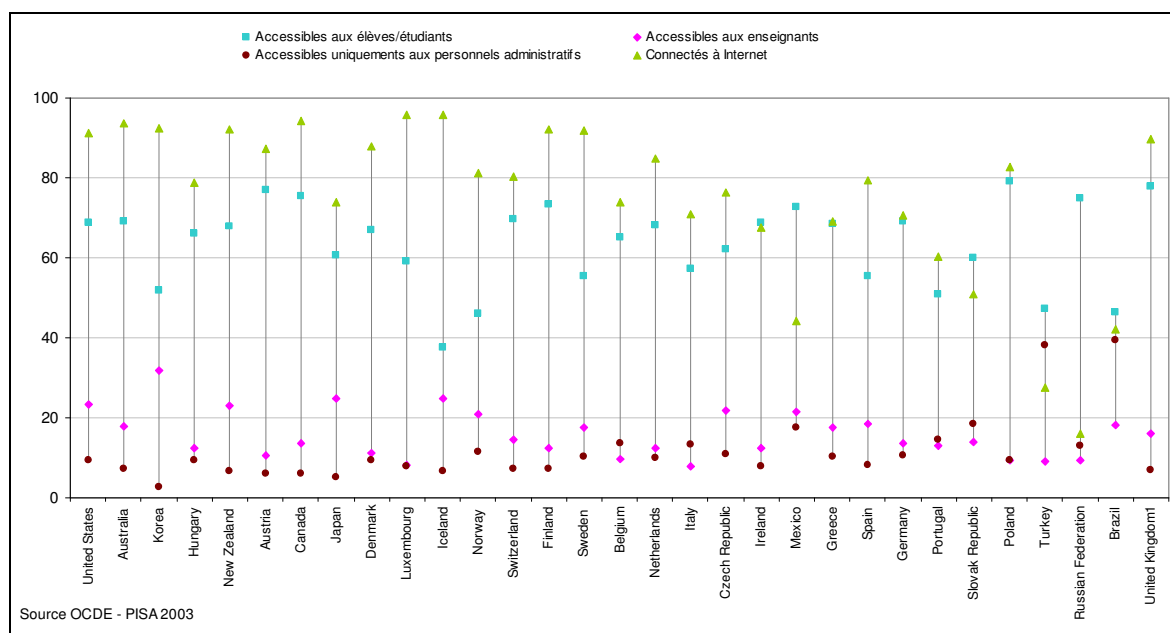
Les dépenses de fonctionnement sont les dépenses afférentes aux biens et services utilisés pendant la période en cours qui doivent être effectuées de manière récurrente afin d'entretenir la production de services éducatifs. Les dépenses mineures concernant l'acquisition de certains types d'équipement sont également incluses dans les dépenses de fonctionnement si elles sont inférieures à un seuil déterminé. Les dépenses de fonctionnement incluent la consommation finale des administrations, les revenus de la propriété payés, les subventions d'exploitation et d'autres transferts courants payés (la sécurité sociale, les allocations d'assistance sociale, les retraites et autres allocations sociales, par exemple). Les dépenses de fonctionnement représentent bien sûr la plus grande part des budgets et en moyenne 91,8% dans les pays de l'OCDE comme nous le montre le Tableau 4. Cela s'explique en partie par le fait que l'acquisition des biens immobiliers est déjà effective et les investissements sont par conséquent globalement limités aux investissements en terme d'équipements. Le Tableau 4 nous révèle également que la plus grosse part des dépenses de fonctionnement concerne la rémunération des ressources humaines des systèmes de formation dépendant d'établissements publics.

	Primaire, secondaire et post-secondaire non tertiaire						Tertiaire					
	Pourcentage des dépenses totales		Pourcentage des dépenses de fonctionnement				Pourcentage des dépenses totales		Pourcentage des dépenses de fonctionnement			
	Dépenses de fonctionnement	Dépenses en capital	Rémunération des enseignants	Rémunération des autres personnels	Rémunération de tous les personnels	Autres dépenses de fonctionnement	Dépenses de fonctionnement	Dépenses en capital	Rémunération des enseignants	Rémunération des autres personnels	Rémunération de tous les personnels	Autres dépenses de fonctionnement
France	91,5	8,5	57,0	23,1	80,1	19,9	89,3	10,7	51,7	28,4	80,1	19,9
Allemagne	93,0	7,0	-	-	83,9	16,1	90,9	9,1	-	-	71,4	28,6
Italie	93,5	6,5	66,2	18,7	84,8	15,2	86,7	13,3	40,4	19,8	60,2	39,8
Luxembourg	81,5	18,5	72,8	12,2	85,0	15,0	-	-	-	-	-	-
Espagne	91,1	8,9	74,6	10,6	85,2	14,8	80,6	19,4	58,5	20,5	79,0	21,0
Royaume-Uni	91,9	8,1	53,0	21,8	74,8	25,2	97,2	2,8	32,4	25,9	58,3	41,7
États-Unis	88,8	11,2	55,4	25,7	81,1	18,9	90,4	9,6	24,2	31,3	55,5	44,5
Moyenne de l'OCDE	91,8	8,2	63,6	15,9	80,2	19,8	89,7	10,3	43,0	23,4	65,5	34,5

Source OCDE - Regards sur l'Éducation 2006

Tableau 4. Dépenses au titre des établissements d'enseignement par catégorie de ressources (2003)

Enfin, en termes de ressources techniques des systèmes de formation, l'accès aux TICE³ est un indicateur permettant de mesurer la capacité des systèmes de formation à être en phase avec la société environnante. La Figure 3 représente de façon synthétique l'accès aux TICE à travers l'accès aux postes informatiques, connectés à Internet ou non, et accessibles, soit aux élèves, soit aux personnels, enseignants comme non enseignants.



Source OCDE - PISA 2003

Figure 3. Pourcentage d'ordinateurs accessibles aux élèves/étudiants, enseignants, administratifs, connectés

³ TICE : La formule « Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Enseignement » fait référence à l'ensemble des outils et logiciels informatiques et multimédia (textes et images fixes ou animés, sons, vidéos...) qui peuvent être intégrés dans un dispositif d'enseignement partiellement ou complètement à distance ou plus simplement dans un cours en salle de cours.

A. II. Situation des systèmes de formation français

Longtemps, le modèle éducatif français a organisé l'évolution de l'éducation dans de nombreuses nations comme le souligne Denis MEURET dans son ouvrage « Gouverner l'École, une comparaison France/États-Unis » [MEURET D., 2007].

Nous présentons dans cette partie de façon synthétique les traits de caractéristique du modèle d'éducation français par sa structure, ses ressources financières, humaines, techniques. Enfin, dans un dernier paragraphe, nous ferons état de quelques constats face au fonctionnement de ce système. Ces observations nous permettront d'entrevoir ainsi quelques voies d'amélioration.

a) Structure du système d'éducation français

Pour la présentation de la structure du système d'éducation français, nous nous focalisons essentiellement sur le système de formation scolaire en laissant de côté le système de formation professionnelle. En effet, ce dernier, dans sa grande majorité, est assuré par des établissements privés et complètement indépendants. Il est ainsi peu aisé d'en tirer une analyse générale. En revanche, le système de formation scolaire, représentant plus des trois quarts des flux de formation, a quant à lui une structure bien identifiée. Ainsi, nous présentons en Annexe 2 la structure globale du système de formation scolaire français où nous pouvons identifier aisément les quatre cycles d'enseignement définis dans la CITE [OCDE, 1999] que sont les enseignements préprimaires, primaires, secondaires et tertiaires ou supérieurs. Nous pouvons également constater la grande diversité des formations qui intervient dès le cycle d'enseignement secondaire, ce qui est assez spécifique à la France. La plupart des cycles de formation présentés sont sous la tutelle du Ministère de l'Éducation Nationale mais selon certaines spécificités, peuvent dépendre en tout ou partie d'autres ministères (Industrie, Agriculture et Pêche,...). La diversité des formations et des établissements les dispensant étant très importante, l'État français a mis en place depuis 1982 avec les lois DEFFERRE une politique de décentralisation visant au transfert de compétences vers les collectivités territoriales. Cette politique se poursuit encore et a été renforcée par la réforme constitutionnelle en 2003 et par la loi du 13 août 2004 relative aux libertés et responsabilités locales. À ce jour, les compétences sont réparties comme présentées dans le Tableau 5.

	École	Collège	Lycée	Université
Investissement (construction, reconstruction) et fonctionnement matériel	commune	département	région	État et partenariat
Fonctionnement pédagogique (micro-informatique...)	commune	État	État	État et partenariat
Personnels enseignants (recrutement, formation, rémunération)	État	État	État	État
Personnels administratifs, techniques, de santé	État	État	région	État
Personnels ouvriers	commune	département	région	État
Programmes d'enseignement	État	État	État	État
Validation des diplômes	-	État	État	État

Source MEN 2007

Tableau 5. Répartition des compétences entre l'État et les collectivités territoriales

Cette répartition des compétences a eu en grande partie des conséquences très positives sur l'agilité des établissements de formation. Cependant, certaines compétences restent encore aujourd'hui mal distribuées et cela engendre divers problèmes de fonctionnement que nous aurons l'occasion d'évoquer par la suite. Le projet de Loi relatif aux libertés des Universités de 2007 vient en partie palier ce phénomène en octroyant une plus grande agilité et flexibilité aux établissements d'enseignement supérieur.

Le système éducatif français accueille pour sa partie scolaire plus de 15 millions d'individus en formation en 2006 répartis ainsi :

- 6 626 500 élèves dans l'enseignement préprimaire et primaire ;
- 6 519 600 élèves dans l'enseignement secondaire ;
- 2 275 000 étudiants dans l'enseignement supérieur.

Pour la partie formation professionnelle, on compte, pour 2004, 472 900 professionnels accueillis et 62,3 millions d'heures/stagiaire de formation dispensées. On dénombre également 368 968 élèves en apprentissage.

En France, l'enseignement est obligatoire de 6 à 16 ans. D'après la loi d'Orientation du 23 avril 2005, cet enseignement obligatoire doit permettre aux élèves d'acquérir un socle commun de compétences que sont :

- La maîtrise de la langue française ;
- La maîtrise des principaux éléments de mathématiques, de culture scientifique et technologique ;
- Une culture humaniste et scientifique permettant le libre exercice de la citoyenneté ;
- La pratique d'au moins une langue vivante étrangère ;
- La maîtrise des techniques usuelles de l'information et de la communication.

Selon le Haut Conseil de l'Éducation, 150 000 élèves sortent du système éducatif chaque année sans aucune qualification soit près de 20% d'une classe d'âge. La Figure 4 présente de façon explicite la répartition des quelques 700 000 sortants annuels selon leur diplôme le plus élevé atteint.

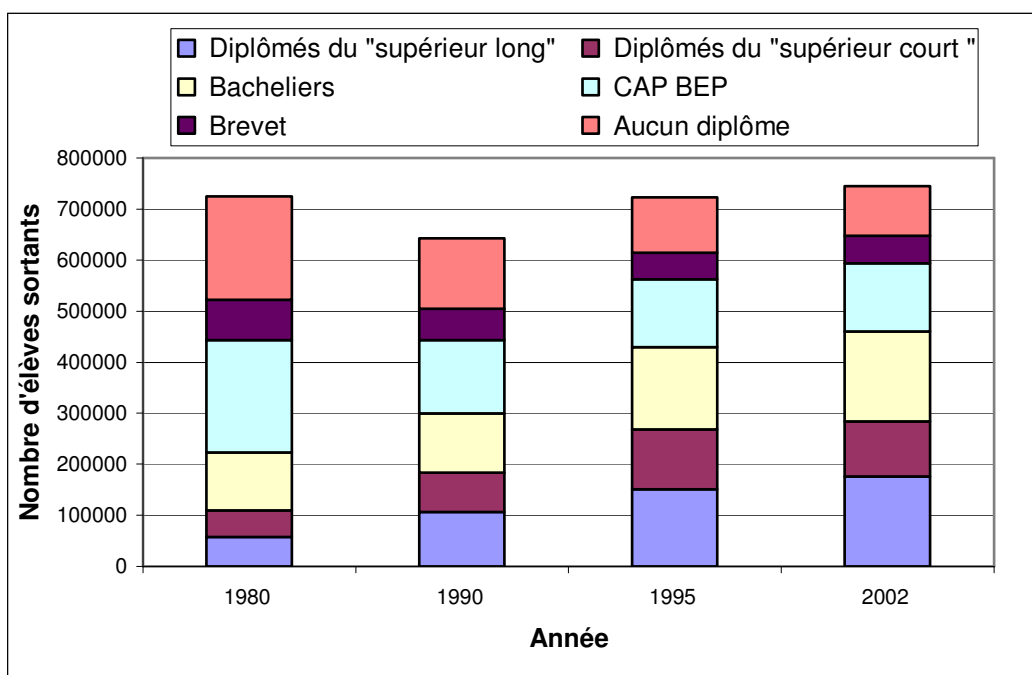


Figure 4. Répartition des sortants de formation initiale selon leur diplôme le plus élevé

En ce qui concerne l'évaluation des élèves, la plus grande partie est assurée par le biais de l'évaluation continue ce qui signifie que les élèves sont évalués de façon très régulière et au fur et à mesure de leur progression. Cependant, le système de formation scolaire français est doté de deux grands examens nationaux, le Brevet des Collèges et le Baccalauréat.

Enfin, le système éducatif français a su se doter d'organes d'autoévaluation lui permettant d'identifier ses dysfonctionnements. De plus, la mise en place en 2003 de la LOLF (Loi Organique sur les Lois de Finance) vise à réformer en profondeur la gestion publique en instaurant une culture de la performance et du résultat. Les organes d'autoévaluation sont les suivants :

- l'I.G.E.N. : Inspection Générale de l'Éducation Nationale, en charge de l'évaluation des enseignements pour les cycles préprimaires, primaires et secondaires. Pour l'enseignement supérieur, c'est le C.N.E. (Comité National d'Évaluation) qui assure cette mission ;
- l'I.G.A.E.N.R : Inspection Générale de l'Administration de l'Éducation Nationale et de la Recherche, effectue des études sur les aspects administratifs, financiers et organisationnels ;
- la D.E.P.P : Direction de l'Évaluation, de la prospective et de la Performance, est en charge de l'évaluation des politiques éducatives.

Théoriquement, la structure du système éducatif français est reconnue comme assez efficace par l'OCDE mais sa mise en œuvre ne semble pas le confirmer...

b) Ressources financières

Les ressources financières du système éducatif français proviennent de six grandes sources que sont le Ministère de l'Éducation Nationale, d'autres ministères (Industrie, Agriculture et Pêche, *etc.*), les collectivités territoriales (région, département, communes), d'autres organismes publics (CAF, *etc.*), les entreprises et enfin les ménages. Le Tableau 6 présente les budgets liés à l'éducation et leurs sources de financement.

	1974	1984	1994	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Education Nationale	7654	28259	48041	56807	58382	59654	61881	62350	63148	65447
Autres ministères	1099	3139	5344	5560	5729	5918	6325	6199	6395	8491
Collectivités territoriales	1790	6895	18486	22317	22793	22717	22978	23942	25271	25117
Autres administrations publiques	37	165	1001	733	769	799	893	914	951	2476
Entreprises	627	2615	4795	5511	5721	5864	7324	7298	7503	7429
Ménages	1651	5906	10007	11789	11961	12275	12466	12772	13009	8962
TOTAL Général	12858	46979	87674	102717	105355	107227	111867	113475	116277	117922
% du PIB	6,40%	7,00%	7,70%	7,60%	7,40%	7,30%	7,20%	7,20%	7,10%	7,00%

Source Repères et références statistiques - MEN 2006

Tableau 6. Évolution de la dépense d'éducation par financeurs finals (en millions d'euros)

Ainsi, on constate que l'État français est le plus gros financeur puisqu'il assume à lui seul plus de 62% des dépenses d'éducation. En 2007, le budget de l'État consacré à l'Éducation Nationale est de 80,2 Milliards d'euros [PLF, 2007]. Cela représente 23,4 % du budget National de la France et en fait ainsi le premier poste budgétaire loin devant, par exemple, le budget alloué à la Défense : 40,7 Milliards d'Euros en 2007. Le budget global des systèmes d'éducation représente donc en moyenne 7 % du PIB et ce depuis plus de trente ans.

Le budget global d'éducation est ventilé sur quatre postes couvrants les systèmes de formation scolaires et professionnels. Ces quatre postes sont l'enseignement préprimaire et primaire, l'enseignement secondaire,

l'enseignement supérieur et enfin, la formation continue. Cette ventilation est assez homogène par rapport à celle observée dans les pays de l'OCDE. Une synthèse de cette répartition budgétaire est présentée à travers le Tableau 7. Enfin, il est intéressant de ramener ces budgets au nombre d'élèves/étudiants concernés afin de découvrir que la dépense moyenne par élève/étudiant est de 7 020 € /élève/an tous niveaux de formation confondus. La Figure 5 présente l'évolution de la dépense annuelle/an en fonction du niveau d'enseignement.

	1974	1984	1994	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Primaire et Préprimaire	3958	13061	23420	27783	28429	28775	29237	29830	30593
Secondaire	5540	21332	39543	46654	47878	48851	50787	51606	52747
Supérieur	1870	7198	14718	17162	17717	18058	18985	19295	19697
Formation continue	1337	4829	8949	9895	10102	10301	11525	11381	11843
Non ventilé	154	559	1044	1223	1228	1242	1333	1363	1397
TOTAL Général	14833	48963	89668	104716	107354	109228	113869	115478	118281

Source Repères et références statistiques - MEN 2006

Tableau 7. Évolution de la dépense d'éducation par niveaux d'enseignement (en millions d'euros)

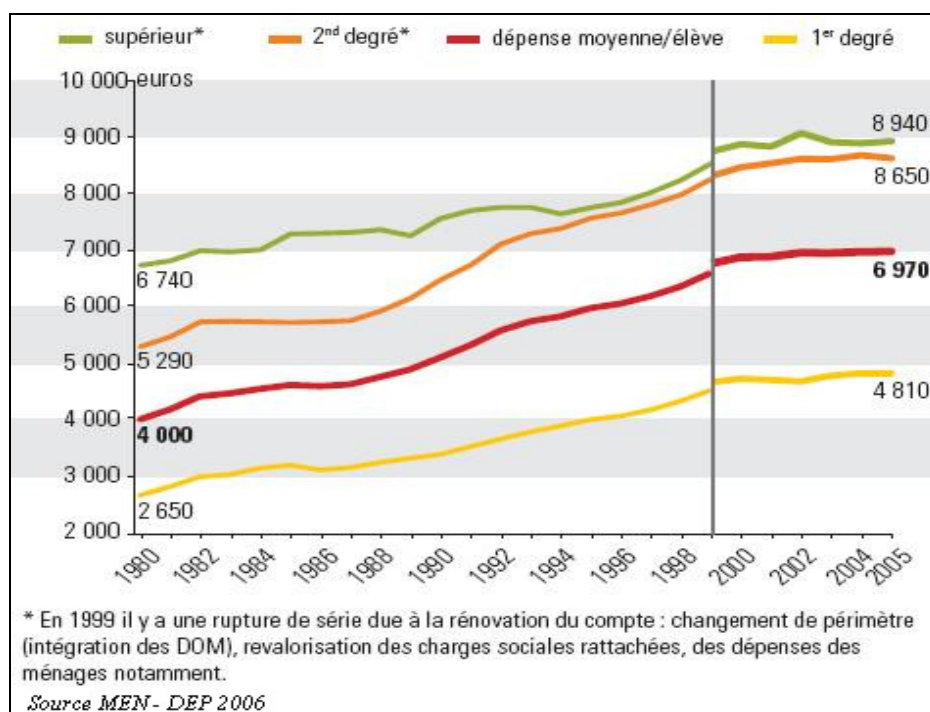


Figure 5. Évolution de la dépense par élève et par niveau d'enseignement

Toutefois, on observe de grosses disparités à l'intérieur même d'un niveau d'enseignement. Par exemple, au niveau de l'enseignement secondaire, le premier cycle (CITE 2, collège) est doté de 7 400€/élève alors que le second cycle (CITE 3, lycée) est quant à lui doté de 10 250€/élève. On observe les mêmes disparités au niveau de l'enseignement supérieur entre les différentes formations car 6 700€/élève sont alloués annuellement pour l'université alors que 12 300€/élève le sont pour les STS⁴ ou encore 13 760€/élève pour les CPGE⁵.

⁴ STS : Sections de Techniciens Supérieurs, dans ces établissements sont formés les étudiants en vue de l'obtention du BTS (Brevet de technicien Supérieur), diplôme à vocation professionnelle immédiate.

⁵ CPGE : Classes Préparatoires aux Grandes Écoles, dans ces établissements, très généralement intégrés aux lycées, sont formés les étudiants en vue de la préparation des concours d'entrée dans les Grandes Écoles, qu'elles soient d'ingénieur ou de commerce.

Enfin, d'après les derniers indicateurs sur l'éducation publiés par l'OCDE, la France consacre à l'enseignement primaire 11% de moins que la moyenne des pays de l'OCDE, 11% de moins également par rapport à la moyenne pour l'enseignement supérieur alors qu'elle consacre 24% de plus que la moyenne pour l'enseignement secondaire. Toutefois, on n'observe pas de lien direct entre le montant de l'investissement financier réalisé et la performance globale du système éducatif concerné.

On peut noter également que la France a mis en place un impôt sur les sociétés, la Taxe d'Apprentissage, visant à ce que les entreprises participent à l'effort collectif pour l'Éducation Nationale. Cet impôt est relativement important car il a permis, à titre d'exemple, de rapporter 762 Millions d'Euros [MEN, 2006a] soit près de 10% de la collaboration directe des entreprises au budget de l'éducation.

Pour conclure, on peut dire que l'éducation reste une priorité budgétaire en France comme dans l'ensemble des pays de l'OCDE.

c) Ressources Humaines

Les ressources humaines du système éducatif français sont de deux natures :

- Les enseignants assurant la formation auprès des élèves/étudiants ;
- Les personnels administratifs, techniques, d'encadrement et de surveillance qui assurent le bon fonctionnement du système.

Le paiement des salaires, pensions et charges de ces personnels représente 75,7% des dépenses sur le budget de l'éducation [MEN, 2006a]. En 2006, on dénombre 993 744 enseignants tandis que les autres agents (administratifs, *etc.*) sont au nombre de 285 957. Ainsi les enseignants représentent 77,7% des personnels de l'éducation. On peut également ajouter que l'âge moyen des personnels est de 42,2 ans et que 64,6% des personnels sont des femmes.

Les enseignants sont répartis dans les différents niveaux d'enseignement de façon relativement inégale comme le présente le Tableau 8. Les taux d'encadrement affichés sont soit sensiblement égaux, soit inférieurs à ceux constatés dans les pays de l'OCDE. Toutefois, il faut relativiser le chiffre concernant l'enseignement supérieur car dans de nombreux établissements, une partie de la formation est assurée par des personnels vacataires qui ne sont pas dénombrés ici.

	Effectif	Nombre d'élèves accueillis	Taux d'encadrement (élèves/enseignant)		
			France	Moyenne OCDE	Moyenne UE-19
Enseignement Préprimaire et Primaire	363285	6626500	18,24	16,10	14,80
Enseignement Secondaire	520736	6519600	12,52	13,30	12,00
Enseignement Supérieur	78355	2275000	29,03	15,50	15,70
Enseignants du CNED	1103	-	-		
Stagiaires des établissements de formation	30265	-	-		
TOTAL	993744	15421100	15,52		

Source MEN et OCDE - 2006

Tableau 8. Répartition des effectifs enseignants et taux d'encadrement 2006

La majeure partie des enseignants sont titulaires de l'Éducation Nationale et ont à ce titre le statut de fonctionnaire de l'État et ainsi la garantie de leur emploi. Pour accéder à ce statut, des concours nationaux existent. Des structures de formation universitaires aident à la préparation de ces concours en accueillant des personnels titulaires d'un diplôme au moins équivalent au niveau licence 3 selon

la classification LMD. Ces structures de formation sont appelées IUFM⁶ et préparent aux concours CAPES⁷, CAPET⁸, CAPEPS⁹, CAPLP¹⁰ et professorat des Écoles. L'agrégation peut, quant à elle, être préparée par année spéciale universitaire et voit environ 2 890 enseignants recrutés par an. Pour l'enseignement privé, deux concours spécifiques existent : le CAFEP¹¹ et le CAER¹². La rémunération des enseignants repose sur l'ancienneté alors que 70% d'entre eux seraient favorables à une évolution de carrière davantage liée à la valeur professionnelle qu'à l'ancienneté [MEN, 2007].

En ce qui concerne les personnels administratifs, techniques, d'encadrement, d'orientation, de surveillance et d'assistance scolaire, ils sont segmentés en trois catégories (A, B et C) en fonction des postes occupés et du degré de responsabilité associé. Les postes à haute responsabilité appartiennent à la catégorie A et incluent par exemple les inspecteurs de l'Éducation Nationale ou les ingénieurs de recherche. La catégorie B regroupe les agents dont la mission revêt un caractère de responsabilité intermédiaire comme les infirmiers ou les techniciens de laboratoire. Enfin, les postes d'exécution forment la catégorie C incluant par exemple les agents administratifs ou les maîtres ouvriers. Le Tableau 9 présente la répartition de ces personnels par catégorie mais également par secteur d'affectation. Les agents titulaires sont également fonctionnaires et l'accès à ces postes est réglementé par concours dans la catégorie correspondante.

	Enseignements Préprimaire, Primaire et Secondaire	Enseignement Supérieur	Vie de l'Elève	Programme de Soutien	Administration centrale	TOTAL
Catégorie A	29632	11990	13978	4414	1663	61677
Catégorie B	9618	13175	8557	6806	785	38941
Catégorie C	24243	28437	91605	10927	955	156167
Non Titulaires	1086	3569	22618	1687	212	29172
TOTAL	64579	57171	136758	23834	3615	285957

Source MEN 2006

Tableau 9. Répartition des personnels administratifs, techniques et d'encadrement 2006

Les systèmes de formation scolaires français regroupent donc plus de 1 279 000 employés et cela place l'Éducation Nationale parmi les tous premiers employeurs à l'échelle nationale.

d) Ressources Techniques

Les ressources techniques représentent 24,3% des dépenses annuelles de l'éducation. Cette dépense est répartie entre le fonctionnement (15,4%) et l'investissement (8,9%). Les dépenses de fonctionnement concernent le maintien des installations ainsi que les dépenses de consommables. L'investissement concerne l'acquisition de nouveaux matériels, équipements, installations.

⁶ IUFM : Institut Universitaire de Formation des Maîtres

⁷ CAPES : Certificat d'Aptitudes au Professorat de l'Enseignement du Second Degré

⁸ CAPET : Certificat d'Aptitudes au Professorat de l'Enseignement Technique

⁹ CAPEPS : Certificat d'Aptitudes au Professorat d'Éducation Physique et Sportive

¹⁰ CAPLP : Concours d'Accès au Professorat de Lycée Professionnel

¹¹ CAFEP : concours d'accès à une liste d'aptitude en vue de l'obtention du certificat d'aptitude aux fonctions d'enseignement dans les classes du second degré sous contrat, correspondant aux concours externes du CAPES, du CAPEPS, du CAPET ou du CAPLP

¹² CAER : concours d'accès à une échelle de rémunération correspondant aux concours internes de l'Agrégation, du CAPES, du CAPEPS, du CAPET ou du CAPLP

Le Tableau 10 présente l'ensemble des actifs immobiliers du système éducatif français. On peut également noter l'indication du nombre d'élèves par classe. Ces chiffres se situent juste dans la moyenne des pays de l'OCDE.

Etablissements	Nombre d'établissements	Nombre de classes total	Effectifs	Nombre Moyen d'élèves/classe
Ecoles Maternelles	17773	88763	2613100	29,44
Ecoles Primaires	38385	192688	4013300	20,83
Collèges	7010	135647	3203277	23,61
Lycées	2625	74627	1976684	26,49
Lycées Professionnels	1708	28783	571347	19,85
Universités	81	-	1283500	-
IUT	114	-	112600	-
STS	2109	-	230400	-
CPGE	407	-	77800	-
Ecoles d'Ingénieurs	250	-	108100	-
Ecoles de Commerce	223	-	87700	-
Ecoles paramédicales et Sociales	563	-	124200	-
Autres établissements	476	-	265100	-
TOTAL	71724			

Source MEN 2006

Tableau 10. Actifs immobiliers du système éducatif français 2006

Concernant les actifs immobiliers, il est intéressant de mentionner plusieurs autres indicateurs comme par exemple la vétusté des installations. En effet, 66,9% des établissements d'enseignement secondaire ont été construits avant 1980 et 42,1% avant 1970 [MEN, 2006a]. On peut également mentionner les surfaces développées moyennes par élève. Les lycées professionnels sont les mieux dotés puisqu'ils accordent 28.8m² par élève alors qu'au collège, c'est seulement 14,7m² pour chaque élève. Enfin, la situation la plus critique est celle des universités où par exemple à la Sorbonne¹³, on compte 2,6 m² par étudiant. À titre de comparaison, le règlement impose qu'un poulet de Bresse jouisse de 10m² pour bénéficier de l'appellation d'origine contrôlée comme le précise Jean Robert PITTE [PITTE J-R., 2006].

De nombreux établissements sont dotés de laboratoires pédagogiques à tous les niveaux afin de permettre aux élèves/étudiants de mettre en application pratique les connaissances théoriques acquises. Cependant, on observe un retard de presque dix ans en moyenne entre les technologies présentes dans les laboratoires pédagogiques et les dernières technologies en usage dans le monde du travail. Cependant, on constate que plus le niveau de formation est élevé (enseignement supérieur,...), plus ces écarts sont faibles.

Enfin, il ne faut pas omettre de parler des TICE. La France a su mettre en place une politique ambitieuse d'équipement en moyens TICE (vidéo projecteurs, ordinateurs, accès au réseau Internet, etc.). Cela, tant à l'usage des élèves/étudiants que des personnels d'éducation. Cette politique porte ses fruits puisque le taux d'équipement en moyens TICE est au dessus de la moyenne des pays de l'OCDE avec en moyenne 6,2 élèves par poste informatique au collège, 4,4 élèves par poste dans les lycées d'enseignement général et technique et 3,1 élèves par poste dans les lycées professionnels. Enfin, 99,2% des établissements

13 La Sorbonne : La Sorbonne est un bâtiment du quartier latin de Paris. Il tire son nom du Théologien du XIII^e siècle Robert de Sorbon, le fondateur du collège de Sorbonne, collège dédié à la théologie du temps de l'ancienne Université de Paris. En 1970, l'Université de Paris a été scindée en treize universités dont plusieurs se partagent désormais le nom de Sorbonne (Universités Paris I, Paris III, Paris IV et Paris V) et disposent de locaux dans le site historique de la rue des Écoles, dans le V^e arrondissement de Paris. Jean Robert PITTE est président de l'université Paris IV Sorbonne.

du secondaire et 99,1% des établissements d'enseignement primaire ont accès à Internet à des fins pédagogiques [MEN, 2006b].

e) Fonctionnement général et constats

Plusieurs observateurs internationaux comme l'OCDE ou l'UNESCO sont très critiques à l'égard du système éducatif français. Bien que l'éducation nationale soit LA priorité nationale et que la France lui consacre une enveloppe budgétaire plus élevée que dans la moyenne des autres pays de l'OCDE, les résultats en termes de performance éducative (mesurée par l'OCDE) ne sont pas au rendez-vous. Cependant, ces observatoires ont du mal à identifier les causes directes ou indirectes de ce problème. En revanche, plusieurs problèmes liés au fonctionnement du système sont relevés. En premier lieu, il est important de mettre en avant le fait que les élèves/étudiants français sont parmi les plus inquiets quant à leur avenir et lorsqu'on leur demande d'auto évaluer leur niveau, ils sont plus que pessimistes tel que le démontre les résultats de PISA¹⁴[OCDE, 2004] . Ce problème peut en grande partie s'expliquer par le déclassement intervenu vis-à-vis des diplômes [GIRET J-F., 2005]. Ce déclassement est bien réel et est une conséquence néfaste de l'augmentation moyenne de la durée des études [NAUZE-FICHET E. et TOMASINI M., 2006]. De plus, à l'horizon 2015, on estime que la demande d'emploi va surtout croître pour les emplois les moins qualifiés, la proportion d'employés et d'ouvriers demeurant la même, soit les deux tiers de la population active [CHARDON O. et ESTRADE M-A., 2007]. Dans ce contexte, on peut s'interroger sur la pertinence de la volonté à faire en sorte que 50% d'une classe d'âge obtienne un diplôme de l'enseignement supérieur, volonté énoncée par François FILLON, Ministre de l'Éducation Nationale en 2005 dans la Loi d'Orientation. En effet, le Tableau 11 montre que pour les ouvriers ou les employés, les diplômes de l'enseignement supérieur s'avèrent en grande partie surqualifiants et donnent lieu à déclassement.

Niveau d'études	bac			bac + 2				2d cycle		3eme cycle				
non dip pour non diplômé, diplômé sinon	non dip.	Tert. (1)	Indust.	non dip. (2)	Santé Trav. soc.	DEUG, DEUST	BTS DUT Tert.	BTS DUT Indust.	LSH, gestion	MST	LSH, gestion	MST	écoles ing.	école comm.
/ professions														
Professions intermédiaires														
instituteurs et assimilés											DEC	DEC	DEC	DEC
PI de la santé et du travail social									DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC
PI admin. De la fonction publique										DEC	DEC		DEC	
PI admin. et co. des entreprises												DEC	DEC	DEC
techniciens												DEC	DEC	DEC
Contremaîtres, agents de maîtrise											DEC	DEC	DEC	DEC
Employés qualifiés														
employés civils et ASFP						DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC
policiers militaires							DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC
employés admin. d'entreprises									DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC
employés de commerce						DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC
Pers. des serv. directs aux part.				DEC		DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC
Employés non qualifiés														
employés civils et ASFP				DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC
policiers militaires	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC
employés admin. d'entreprises				DEC		DEC	DEC		DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC
employés de commerce				DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC
Pers. des serv. directs aux part.				DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC
Ouvriers qualifiés														
ouvriers de type industriel							DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC
ouvriers de type artisanal						DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC
Chauffeurs				DEC		DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC
ouvriers de la manut., magas. transp.					DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC
Ouvriers non qualifiés														
ouvriers NQ de type industriel				DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC
ouvriers NQ de type artisanal		DEC		DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC
ouvriers agricoles		DEC		DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC

(1) comprend les bac santé travail social qui sont très peu nombreux dans l'échantillon (comme diplôme final de sortie)

(2) comprend les bac généraux et les non diplômés de niveau Bac+1 qui sont très peu nombreux dans l'échantillon

Tableau 11. Déclassement par catégorie d'emploi en fonction du diplôme possédé (2006) [LEMISTRE P., 2007]

¹⁴ PISA : *Programme International pour le Suivi des Acquis* des élèves, il s'agit d'un programme international d'évaluation des compétences des élèves à travers plus de 60 pays. Cette étude a été mise en place par l'OCDE pour la première fois en 2000 et a lieu tous les trois ans.

La France est l'un des pays possédant le taux de redoublement le plus élevé parmi les pays de l'OCDE. En effet, 38% des enfants de 15 ans (fin du premier cycle de l'enseignement secondaire – CITE 2) ont déjà redoublé au moins une fois (contre 2,8% en Finlande) et plutôt que de remettre en cause le système, on préfère dire que « les élèves sont mauvais » !! Dans ce contexte, on peut mieux percevoir que les élèves étudiants français soient inquiets d'autant que l'échec a une forte corrélation avec l'origine sociale des familles. En primaire, 3% des enfants d'enseignants redoublent, contre 41% pour les enfants d'inactifs. À l'entrée en sixième, 94% des enfants de cadres n'ont jamais redoublé contre 67% seulement des enfants d'ouvriers. On retrouve le même phénomène dans l'enseignement supérieur car, au sein des CPGE (Classes Préparatoires aux Grandes Écoles), on compte 51,9% d'enfants de cadres contre 5% d'enfants d'ouvriers. La Loi d'Orientation sur l'École de 1989 s'était fixé comme objectif de réduire les inégalités sociales au sein de l'école mais manifestement, cet objectif n'est pas atteint. Le Haut Conseil de l'Éducation déclare même que ces inégalités ont été amplifiées par le système scolaire. Le constat est le même en ce qui concerne le baccalauréat puisque cette même Loi d'Orientation sur l'École de 1989 envisageait, sur un horizon de dix ans, d'amener 80% d'une classe d'âge au baccalauréat. À ce jour, on compte « seulement » 64,2% d'une classe d'âge ayant obtenu ce diplôme marquant la fin de l'enseignement secondaire et donnant accès à l'enseignement supérieur. Cet examen, monument de l'Éducation Nationale Française, a vu se dégrader son fonctionnement et son intérêt au fil des ans. Aujourd'hui, 93% des élèves entrant en terminale obtiennent ce diplôme en un, deux, ou trois ans et le taux de réussite est proportionnel aux journées de cours perdues. Ce paradoxe s'est notamment vérifié en 2006, année où de nombreux lycées ont été fermés durant plusieurs semaines en raison du mouvement anti-CPE et où, en juin, le taux de réussite au baccalauréat atteignait un nouveau record avec 82% de reçus et même 86,2% pour les filières générales.

La France s'est marginalisée en refusant d'adopter une part de contrôle continu pour la validation du second cycle de l'enseignement supérieur comme c'est le cas dans la quasi-totalité des pays de l'OCDE. Reste à parler du coût de ce Monument : plus de 61 euros par élève soit un coût total de 38 millions d'euros pour la session 2007. Le rôle de sélection qu'occupait le baccalauréat pour l'accès à l'enseignement supérieur n'est plus assuré. C'est de cette manière que les établissements d'enseignement supérieur ne pouvant assurer une sélection à leur entrée ont un taux d'échec élevé.

Sur l'ensemble des étudiants qui entrent à l'université, 41% en sortent sans diplôme alors qu'on en compte seulement 17% au Royaume-Uni ou 6% au Japon. Outre l'échec important dans les formations supérieures, la formalisation des qualifications [VINCENS J., 2006] attendues n'est pas ou peu réalisée lors de la conception des formations et l'analyse des flux. Cela a donné naissance à des filières d'enseignement au taux d'emploi ridiculement bas (inférieur à 50% au bout d'un an), même en formation diplômante alors que d'autres filières ne parviennent pas à fournir le nombre de diplômés attendus par le marché de l'emploi.

On observe également des formations supérieures dont le rôle est détourné de l'objectif qu'elles s'étaient fixées. On peut citer l'exemple des CPGE qui ont pour vocation de préparer les étudiants pour l'intégration des Grandes Écoles. En réalité, seulement 60% des étudiants intègrent effectivement une Grande École. C'est encore plus flagrant pour les CPGE Littéraires où plus de 63% des étudiants se dirigent vers l'université [MEN, 2006c]. Un des objectifs de l'Éducation

Nationale étant le soutien et le développement de la recherche universitaire pour encourager la création de connaissances, il est regrettable de constater que le nombre de publications scientifiques françaises ramené au nombre d'habitant est parmi les plus faibles d'Europe. En France, on compte 12 publications par millions d'habitants alors que l'on en dénombre 50 aux États-Unis ou encore 69 au Danemark [OCDE, 2006].

Il est important de noter que le système éducatif français n'encourage pas la compétitivité. En effet, la régionalisation des universités ou encore la carte scolaire sont des mesures qui constituent un réel frein à la réduction des inégalités sociales alors que c'est précisément un des objectifs affichés. L'autre trait qui caractérise le système éducatif français est une grande propension à l'immobilisme essentiellement par peur du changement. En effet, alors que la gouvernance souhaite faire évoluer ce système, elle se trouve confrontée à une opposition souvent massive et parfois peu cohérente. On peut citer à titre d'exemple la situation face à la mise en place des TPE (Travaux Personnels Encadrés) dans les classes de première et de terminale. Lors de leur proposition par Claude ALLEGRE, ministre de l'Éducation Nationale, ils connurent une farouche opposition entraînant des mouvements sociaux. Lorsque François FILLON, ministre de l'Éducation Nationale, voulut les remettre en cause pour les supprimer, ils furent âprement défendus par ceux qui les avaient décriés quelques années plus tôt. À l'instar de la mise en place des TPE, certaines réformes demandent beaucoup de temps pour être acceptées [PROST A., 2000]. Cependant, certaines réformes ont pu être entreprises mais certaines rencontrent un succès mitigé. On peut citer par exemple en 1981 la mise en place des ZEP¹⁵. Afin de réduire les inégalités entre les établissements en fonction du public accueilli, on a proposé aux établissements « difficiles » ce classement en ZEP afin qu'ils puissent bénéficier de subventions complémentaires et ainsi mieux rémunérer par exemple les personnels dont la charge est de ce fait, plus « difficile ». Malheureusement, trop d'établissements ont été classés en ZEP et les subventions réparties entre ceux-ci se sont révélées ridicules à l'échelle d'un établissement. Le maigre apport financier n'a ainsi pas réussi à « attirer » les meilleurs enseignants dans ces zones qui en auraient eu bien besoin...

L'autre exemple est celui de la mise en place de l'enseignement des langues étrangères dès l'enseignement primaire. Les dernières évaluations en date indiquent que l'on n'observe aucune différence entre les élèves ayant commencé l'apprentissage dès le primaire et les autres. Ainsi, les moyens développés arrosent-ils, pour le moment, le désert.

Le manque de confiance dans le système éducatif de la part des élèves et de leur famille a conduit progressivement au développement de solutions annexes au système et notamment par le biais des heures de soutien scolaire privé à domicile. En France, ACADOMIA, leader, sur le marché, totalise 2 500 000 heures de formation dispensées en 2006/2007 alors que l'on en comptait 200 000 en 1995/1996. Situation étonnante alors qu'on dénombre, d'après la cours des comptes, 32 000 enseignants qui...n'enseignent pas ! Soit près de 3% de l'effectif total.

Enfin, on peut parler du positionnement de l'enseignement supérieur français où l'on ne trouve que quatre universités/écoles françaises parmi les cent meilleures recensées et classées par l'IHE¹⁶ de Shangai [IHE, 2006].

¹⁵ ZEP : Zones d'Éducation Prioritaires

¹⁶ IHE : Institute for Higher Education, laboratoire de l'université de Shangai qui réalise depuis 2004 un classement annuel des 500 meilleures universités/Écoles à l'échelle mondiale.

Ainsi, le système éducatif français ne se distingue pas par sa performance et il est évident que de nombreux chantiers sont à bâtir afin de le faire évoluer en phase avec les attentes de la société.

A. III. Situation des systèmes de formation européens et mondiaux

Afin de présenter de façon claire la situation des systèmes de formation en Europe et dans le monde, nous reprenons la structure adoptée pour la présentation des systèmes de formation français. Ainsi, nous insistons sur les généricités mises en évidence et indiqueront lorsque celles-ci diffèrent du modèle français. Toutefois, nous pourrions constater que baser nos travaux sur la situation du modèle français est tout à fait cohérent puisque les corrélations observées avec les autres systèmes sont très nombreuses.

a) Structures des systèmes éducatifs internationaux

La structure des systèmes de formation européens et mondiaux est globalement assez homogène avec celle observée en France. On compte quatre niveaux d'enseignement que sont le préprimaire, le primaire, le secondaire et le tertiaire ou le supérieur. La quasi-totalité des pays observés dispose d'une plage de formation obligatoire. Dans la plupart des cas, cette plage couvre l'ensemble de l'enseignement primaire ainsi que le premier cycle de l'enseignement secondaire (collège en France). Durant cette période, on observe des enseignements homogènes (hors handicaps) alors qu'au-delà, les parcours différenciés sont nombreux. Lors de cette différenciation, on observe que la formation à vocation professionnelle accueille plus d'élèves que les formations générales (En Europe, c'est plus de 60% d'enseignements professionnels contre 53% en moyenne dans les pays de l'OCDE). C'est également le cas en France. Le temps d'instruction prévu entre 7 et 15 ans (moyenne de l'enseignement obligatoire) est plutôt homogène puisque compris dans une fourchette +/- 20% par rapport à la moyenne qui est de 7810 heures comme l'indique le Tableau 12. Toutefois, on ne peut pas rapprocher ces volumes horaires des performances éducatives car les chiffres montrent qu'il n'y a pas de lien de cause à effet. Par exemple, la Finlande, avec le plus faible cumul horaire, est classée première pour ses performances selon la dernière enquête PISA [OCDE, 2004].

	Nombre annuel moyen d'heures totales d'instruction prévue				
	De 7 à 8 ans	De 9 à 11 ans	De 12 à 14 ans	À 15 ans	Total de 7 à 15 ans
Finlande	530	673	815	858	6381
Suède	741	741	741	741	6665
Corée	612	703	867	1020	6953
Danemark	641	743	870	840	6960
Allemagne	631	788	875	892	7142
Luxembourg	847	847	782	750	7332
Japon	712	776	871	981	7344
Espagne	792	792	956	978	7806
Autriche	755	835	985	1080	8048
Angleterre	888	894	938	950	8224
Belgique	840	840	1020	1020	8280
Mexique	800	800	1167	1124	8624
France	883	871	1055	1148	8692
Italie	990	990	963	908	8745
Nouvelle-Zélande	985	985	962	950	8760
Australie	981	982	1010	1020	8958
Moyenne de l'OCDE	785	831	928	962	7810
Moyenne de l'UE-19	786	834	928	959	7816

Source Regards sur l'Education - OCDE 2006

Tableau 12. Volumes horaires d'instruction prévue entre 7 et 15 ans dans les pays de l'OCDE (2004)

En ce qui concerne l'enseignement supérieur, la majeure partie est composée de systèmes universitaires. On constate depuis dix ans une évolution progressive dans la structure et le fonctionnement des systèmes d'enseignement supérieur. Cette évolution est due à une volonté ferme d'homogénéisation afin de faciliter les échanges internationaux d'étudiants. En Europe, cette volonté a été initialisée par le processus de Bologne, signé en 1999, manifestant la volonté d'homogénéisation des formations supérieures d'ici à l'horizon 2010. Outre la mise en place des crédits ECTS¹⁷ au sein de l'union européenne, on distingue à présent trois niveaux de formation reconnus que sont la licence, niveau L, le master, niveau M, et enfin le doctorat, niveau D. Ceci constitue les fondements du système LMD permettant une meilleure lecture du système. Malgré l'échéance fixée à 2010, la plupart des nations européennes ont déjà fait évoluer leur système d'enseignement supérieur pour le conformer au LMD et au système de crédits ECTS. Ce système ayant déjà commencé à montrer son efficacité, des universités hors Union Européenne adhèrent à ce système. En revanche, on constate que des nations européennes restent en marge du processus de Bologne. A titre d'exemple, l'Espagne vient récemment de rénover sa formation d'ingénieurs, anciennement en 3 ans ou 5 ans, pour passer en formation unique à 4 ans, soit hors LMD. Enfin, l'Europe a compris que la lecture des formations universitaires par le monde de l'emploi est fondamentale pour garantir un haut niveau d'emploi. Aussi, dans le cadre du processus de Bologne, on recommande la mise en place du « supplément au diplôme », permettant de retracer le parcours de l'étudiant dans le système universitaire.

En ce qui concerne la distinction enseignement privé et enseignement public, on constate à l'échelle européenne que 82% de l'enseignement tout cycle confondu est assuré par des établissements publics. Cependant, cette proportion est d'autant plus faible que le niveau d'enseignement augmente. Cela se vérifie à l'échelle mondiale car selon l'OCDE, 89,1% de l'enseignement primaire (CITE 1) est réalisé par des établissements publics alors que cette proportion tombe à 81% dans l'enseignement secondaire (CITE 2 et 3). Dans l'enseignement supérieur (CITE 5), on ne compte que 64,9% des enseignements qui sont réalisés par des établissements publics.

Enfin, on peut rapidement évoquer les organes d'évaluation des systèmes d'enseignement. La politique la plus répandue consiste à la mise en place d'évaluations externes effectuées à l'échelle nationale ou internationale. Très peu de systèmes de formation disposent de systèmes d'évaluation interne. Cependant, on compte de plus en plus d'universités développant une politique de certification qualité à l'instar de ce que l'on observe dans le monde industriel. En Europe, une association a été créée pour appuyer les démarches de certification : l'ENQA¹⁸.

b) Ressources financières

Le financement des systèmes de formation des pays d'Europe et du monde représente, comme en France, un poids important. En moyenne, dans les pays de l'OCDE, les dépenses d'éducation représentent 6,3% du PIB de la nation

¹⁷ ECTS : European Credit Transfer System, système de crédits mis en place à l'échelle européenne permettant de faciliter les échanges internationaux en encourageant la reconnaissance mutuelle des formations. Une année équivaut à 60 crédits ECTS, un semestre à 30 et un trimestre à 20 crédits.

¹⁸ ENQA : European Association for Quality Assurance in Higher Education, association : C'est le réseau européen des agences d'évaluation. L'objet même de l'ENQA est de favoriser, entre agences, les échanges d'expériences et la dissémination des bonnes pratiques mais aussi de faire du réseau un acteur politique dans le champ de l'assurance-qualité.

concernée. En 2003, on a dépensé en moyenne 7471 dollars par élève/étudiant. Cependant, on observe de grosses différences d'une nation à l'autre puisqu'au États-Unis, on dépense 12023 dollars par élève/étudiant/an alors qu'au Brésil, c'est seulement 1242 dollars par élève/étudiant/an soit près de dix fois moins. Globalement, les dépenses d'éducation sont également ventilées de façon hétérogène entre les niveaux d'enseignement puisqu'on compte en 2003 en moyenne 5055 dollars par élève de l'enseignement primaire alors qu'on accorde pour la même période en moyenne 6936 dollars par élève de l'enseignement secondaire et 14598 dollars par étudiant de l'enseignement supérieur. Cette différence importante s'explique en grande partie par le coût des ressources humaines et techniques qui s'avère plus important dans le supérieur (plus spécialisé, plus qualifié). En ce qui concerne l'origine de ces ressources financières, elle est essentiellement publique (88% en moyenne [OCDE, 2006]) même s'il on observe encore une fois de grosses disparités entre les nations et entre les niveaux de formation comme l'indique le Tableau 13.

	Tous niveaux d'enseignements confondus				Pré-primaire	Primaire et secondaire	tertiaire
	Financement public	Financement privé			Financement public	Financement public	Financement public
		Dépenses des ménages	Dépenses d'autres entités privées	Total du financement privé			
Australie	73,9	19,6	6,5	26,1	71,7	83,7	48,0
Autriche	94,5	2,5	2,9	5,5	78,8	97,2	92,7
Belgique	94,2	4,9	0,9	5,8	97,2	95,9	86,7
France	90,4	7,1	2,6	9,6	95,6	92,4	81,3
Allemagne	82,6	6,4	11,0	17,4	72,1	82,1	87,1
Grèce	94,5	4,9	0,6	5,5	x(6)	93,0	97,4
Italie	91,9	6,4	1,7	8,1	90,6	97,1	72,1
Japon	74,1	23,1	2,8	25,9	50,6	91,3	39,7
Corée	60,0	32,0	8,1	40,0	31,7	79,3	23,2
Mexique	81,3	18,5	0,2	18,7	85,9	83,5	69,1
Pays-Bas	90,4	5,8	3,8	9,6	97,0	94,1	78,6
Rép. slovaque	90,2	7,3	2,5	9,8	85,5	91,8	86,2
Espagne	88,6	10,5	0,9	11,4	87,2	93,4	76,9
Royaume-Uni	84,0	13,9	2,1	16,0	94,6	86,5	70,2
États-Unis	72,3	19,9	7,8	27,7	76,6	91,9	42,8
Moyenne de l'OCDE	88,0	~	~	12,0	81,5	92,7	76,4
Moyenne de l'UE-19	92,0	~	~	8,0	89,7	94,6	84,3

Source Reagrd sur l'Education - OCDE 2006

Tableau 13. Origine publique privée des ressources financières des systèmes de formation (2003)

On constate à la lecture du tableau ci-dessus que la part de financements privés est beaucoup plus forte dans l'enseignement supérieur. Cela s'explique en partie par le montant des frais d'inscription dans le supérieur qui peuvent varier énormément d'un pays à l'autre. Certains pays comme la Finlande, le Danemark ou la république Tchèque ne demandent aucun frais d'inscription alors qu'aux États-Unis, la moyenne des frais d'inscription dans les établissements publics d'enseignement supérieur se monte à 4587 dollars et 17777 dollars dans les établissements privés d'enseignement supérieur.

Cependant, les budgets nationaux consacrent de plus en plus de ressources à l'enseignement supérieur dans la mesure où un plus grand nombre d'individus poursuivent leurs études jusqu'à l'obtention d'un diplôme du supérieur. La population dans ces établissements a donc une forte tendance à augmenter. De

plus, la démographie joue un rôle non négligeable car les effectifs des établissements d'enseignement primaire et secondaire diminuent et cette tendance devrait s'accroître d'ici à 2015 comme l'indique la Figure 6.

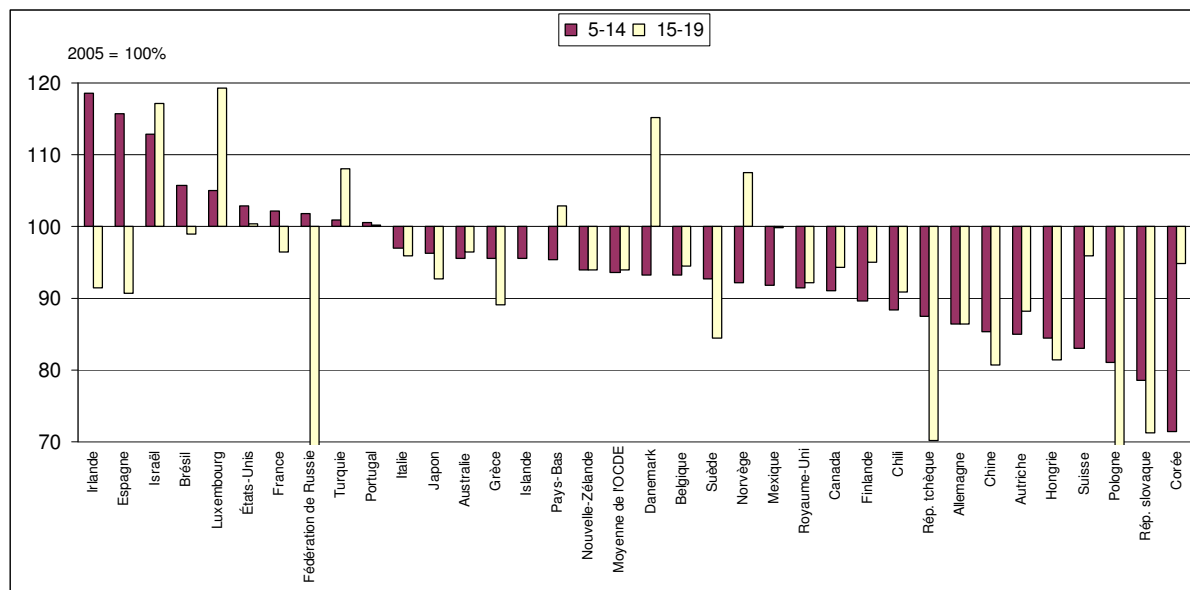


Figure 6. Évolution démographique attendue pour 2015 pour les jeunes de 5 à 19 ans (2005)

c) Ressources Humaines

A l'instar de la situation observée en France, les ressources humaines des systèmes de formation européens et mondiaux représentent le plus gros poste de dépense, notamment par la rémunération, le paiement des charges et pensions mais également par le coût de la formation de ces personnels qu'elle soit initiale ou continue. En effet, la rémunération des personnels enseignants et non enseignants représente plus de 80,2% des dépenses totales de fonctionnement des établissements d'enseignement secondaire alors qu'elle n'y contribue que pour 65,5% dans le supérieur. Cette différence s'explique par le fait que les infrastructures et les équipements ont un coût plus élevé à ce niveau. En ce qui concerne le montant de la rémunération des personnels enseignants, on observe des variations d'un état à l'autre mais en moyenne, le salaire d'un enseignant est équivalent à 1,35 fois le PIB par habitant de la nation correspondante comme présenté à la Figure 7.

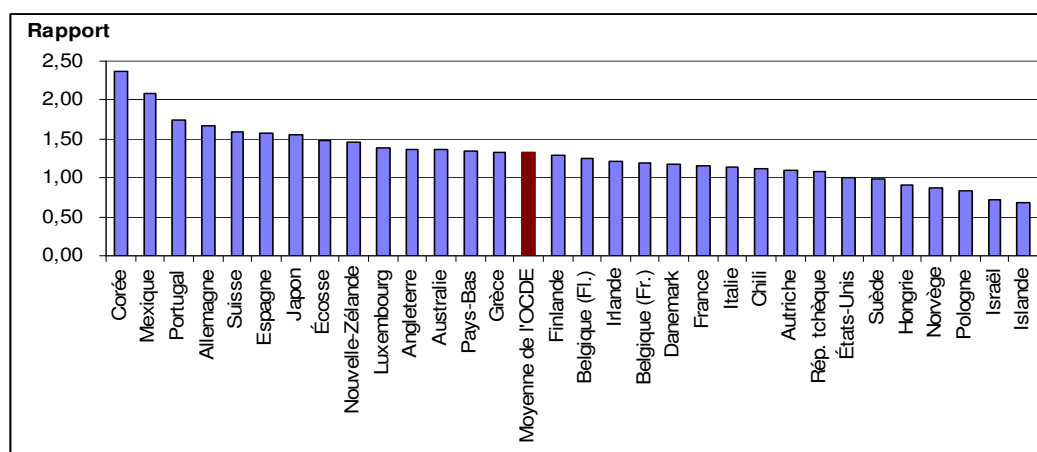


Figure 7. Rapport entre le salaire moyen enseignant et le PIB par habitant (2004)

Par rapport à ces différences observées sur le salaire, on peut noter également des écarts entre les nations au niveau des services horaires annuels que doit effectuer un enseignant. Par exemple, aux États-Unis, un enseignant du premier cycle de l'enseignement secondaire doit effectuer 1080 heures contre 534 heures d'enseignement pour un enseignant japonais, la moyenne pour les pays de l'OCDE étant de 704 heures annuelles.

Dans la majeure partie des pays observés, les personnels enseignants et non enseignants (administratifs, techniques, *etc.*) ont un statut d'agent contractuel contrairement notamment à la France, l'Espagne ou encore le Portugal où ils sont fonctionnaires de l'État.

Enfin, en ce qui concerne la formation des personnels enseignant, la majorité des pays observés disposent de formations spécifiques pour les enseignants. En revanche, dans moins de la moitié des cas, les enseignants en poste doivent continuer de se former par le biais de la formation continue. Cela pose un vrai questionnement sur l'actualisation des compétences chez ceux-ci, surtout dans les domaines à fortes évolutions.

d) Ressources Techniques

Malheureusement, nous ne disposons que de peu d'indicateurs concernant les ressources techniques des systèmes de formation à l'échelle mondiale. Cependant, nous pouvons constater que le niveau d'équipement des systèmes de formation en termes de ressources techniques est globalement homogène avec le niveau de développement des nations. Cela concerne la vétusté des bâtiments, installations de base (tables, chaises, *etc.*), les laboratoires pédagogiques, l'usage des TICE, l'accès aux médias divers (littérature, audiovisuel, *etc.*). Ainsi, le nombre d'élèves par ordinateur peut-il varier de 42 pour le Brésil à moins de 4 pour les États-Unis ou l'Australie, la moyenne des pays de l'OCDE étant à 6,5. Autre exemple que l'on peut citer, c'est l'accès à une bibliothèque à l'intérieur des établissements d'enseignement primaire. Alors qu'en Europe, plus de 70% des établissements d'enseignement primaire disposent d'une bibliothèque et 22% d'un espace dédié à la lecture en classe [EURYDICE, 2005], on n'en compte que 82% au niveau mondial ayant accès à des ressources littéraires. Enfin, les dépenses en ressources techniques (achat, maintien, libération) représentent en moyenne 23% des dépenses d'éducation générales tous niveaux de formation confondus.

e) Fonctionnements généraux, constats

Il est naturellement plus difficile de commenter le fonctionnement des systèmes éducatifs internationaux pour une raison principale : ils sont hétérogènes. Cependant, de grandes tendances se dégagent. Ce sont essentiellement celles qui nous permettront de justifier la restriction de notre champ d'étude à l'enseignement supérieur par la suite. La première tendance évidente est l'augmentation de la durée moyenne et ainsi, du niveau de compétences moyen de la population moyenne. En effet, si l'on regarde la population actuelle des 25 à 64 ans, ils ont passé dans le système éducatif en moyenne 11,9 années. Parmi les plus faibles, on trouve le Portugal avec en moyenne 8,5 années contre 13,9 années pour les norvégiens, population ayant passé le plus d'années dans le système éducatif. En comparaison à cette moyenne de 11,9 années de formation, les chiffres actuels concernant l'espérance de formation tout au long de la vie est beaucoup plus importante puisqu'elle atteint en moyenne 17,4 années pour un enfant de 5 ans. Toutefois, là encore on observe

des disparités entre les nations où on dépasse les 20 années pour le Royaume-Uni ou l'Australie alors qu'on n'atteint pas les 13 années pour la Turquie comme nous le montre la Figure 8.

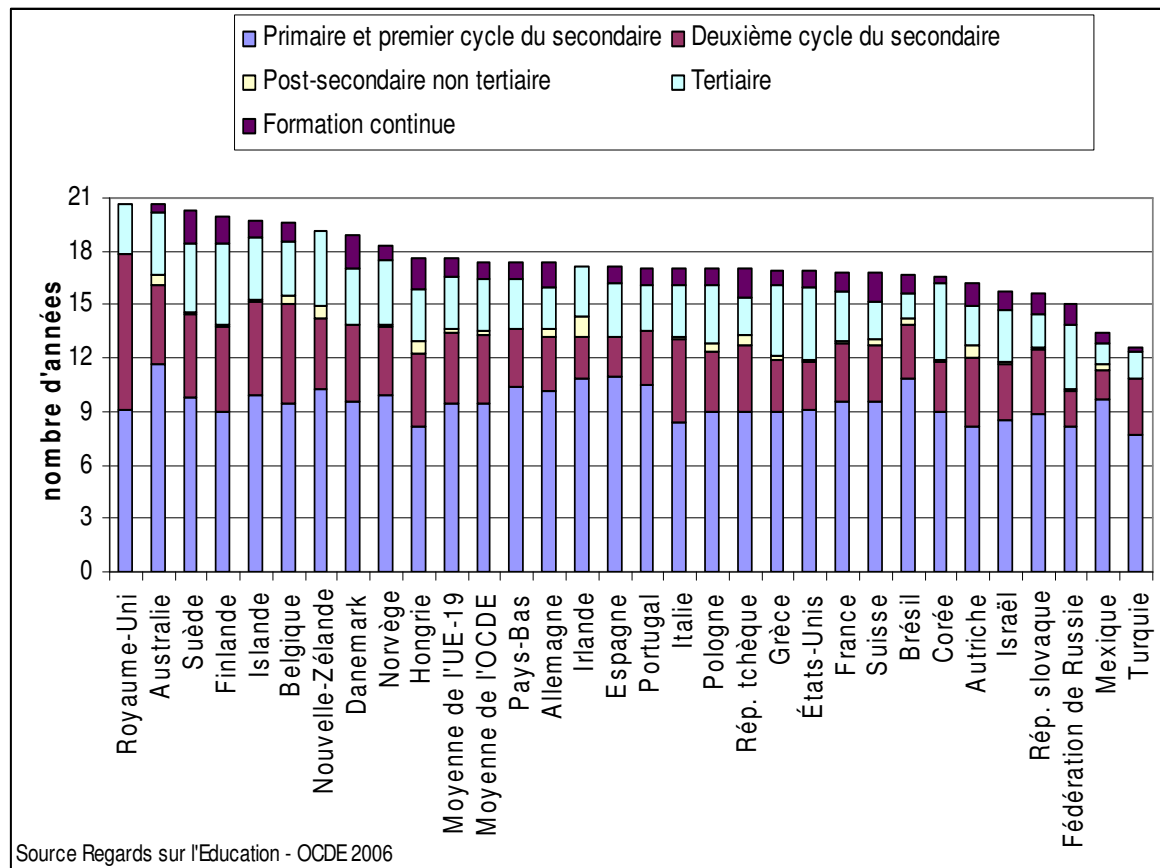


Figure 8. Espérance de scolarisation et de formation continue pour un enfant âgé de 5 ans (2004)

Ainsi on compte plus de huit individus sur dix, de part le monde, qui obtiennent un diplôme de fin d'études secondaires et plus d'un sur trois un diplôme de fin d'études tertiaires ou supérieures. Cependant, là encore des différences apparaissent puisqu'en Allemagne, Autriche et République Tchèque, seul un individu sur cinq décroche un diplôme universitaire, voire un sur dix seulement en Turquie. Cela aura de fortes répercussions sur la répartition de la main d'œuvre hautement qualifiée dans les années à venir [OCDE, 2006]. De plus les taux de réussite lors de l'entreprise d'études tertiaires varient énormément et ont parfois de quoi être décourageant notamment aux États-Unis, au Mexique ou en Nouvelle Zélande où seulement un peu plus de 50% des jeunes débutant une formation supérieure obtiendront un diplôme. En revanche, c'est plus de 80% en Corée ou en Irlande qui seront diplômés à l'issue de leur formation dans l'enseignement tertiaire.

L'accroissement du niveau de compétences dans la population mondiale notamment grâce à l'augmentation de la durée des études a également des conséquences sur la population active sortie du système scolaire. On observe une forte montée de la formation continue, largement encouragée par les employeurs mais malheureusement, on trouve encore de grandes disparités selon les pays. En Grèce, en Italie et aux Pays-Bas, les adultes titulaires d'un diplôme tertiaire sont relativement moins susceptibles de se livrer à des activités de formation continue,

ne suivant en moyenne que 300 heures de formation pendant toute leur vie contre plus d'un millier d'heures au Danemark, en Finlande, en France et en Suisse.

À l'instar de ce que nous avons pu observer dans le cas du système de formation français, les diplômes délivrés dans l'enseignement supérieur sont d'un niveau de compétences trop élevé pour les futurs employés ou ouvriers (Tableau 11, voir page 25). Les perspectives d'emploi à l'échelle mondiale comptent plus de 60% d'employés et d'ouvriers qui se verraient ainsi déclassés par rapport au diplôme qu'ils posséderaient.

Afin, entre autre, d'endiguer ce phénomène, de nombreuses nations filtrent l'accès à l'enseignement supérieur par un principe de sélection permettant d'une part, une régulation des flux, et d'autre part, d'éviter que des individus ayant peu de chances de succès ne perdent leur temps dans ces systèmes. Les statistiques étudiées nous ont permis de mettre en avant que les résultats en termes d'individus diplômés du supérieur par rapport à la population totale sont les mêmes. Cependant, comme l'indique la Figure 9, la méthode pour parvenir à ce résultat est distincte et il est évident que le système à accès restreint semble plus efficient car mobilisant moins de ressources humaines et techniques pour la formation supérieure, le public accueilli étant moins nombreux.

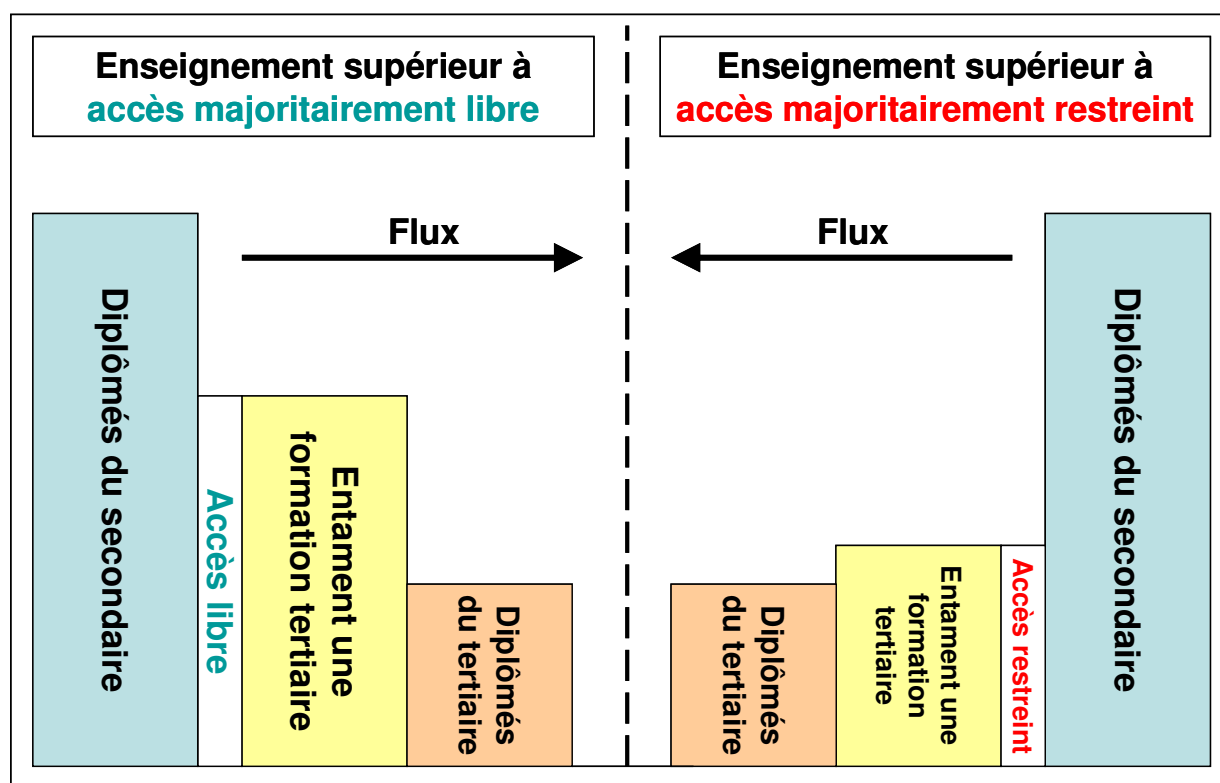


Figure 9. Distinction accès libre - accès restreint dans l'enseignement supérieur

Enfin, en termes d'accès, on ne peut omettre d'évoquer les accès dans les niveaux d'enseignements primaire et secondaire. Là encore, deux politiques s'opposent avec d'un côté, un accès libre et de l'autre, un accès réglementé par la localisation géographique du foyer de résidence de l'élève. Ces enseignements faisant quasi systématiquement partie de la plage d'éducation obligatoire, on ne rencontre pas d'autres alternatives.

Il n'a malheureusement pas été possible de distinguer la performance entre ces deux systèmes même si l'accès libre a très grandement favorisé la compétition

inter établissements, notion assez incompatible avec celle de service public dans les pays où l'éducation est considérée comme service public.

Nous concluons cette partie sur une observation de l'OCDE donnant sens à nos travaux. Il apparaît que les systèmes de formation dont le pilotage est le plus décentralisé, à savoir au plus proche du processus de formation, sont également les plus performants. C'est notamment le cas de la Finlande où l'administration centrale n'a qu'un rôle de conseil et supervision alors que chaque établissement possède plusieurs degrés de pilotage, notamment concernant les méthodes, programmes détaillés ou volumes horaires. Ainsi, la Finlande, par une plus grande adaptabilité du système, parvient à classer ses élèves parmi les tous premiers en termes de résultats aux tests PISA [OCDE, 2004].

La performance des systèmes de formation semble donc plus conditionnée à leur agilité et leur flexibilité afin de pouvoir mieux satisfaire, en terme de qualité, coûts, et délais leurs clients. Nous revenons sur ces différentes notions dans la présentation de l'ingénierie de formation

B. Présentation de l'ingénierie des systèmes de formation

La présentation des systèmes de formation sous leurs aspects généraux, et tels qu'ils sont développés en France et dans les autres pays du monde, nous permet de constater que l'origine principale des dysfonctionnements est organisationnelle. En effet, nous n'avons que peu d'indicateurs sur les pratiques pédagogiques en tant que telles mais ceux que nous possédons ne permettent pas d'associer formellement ce critère à ceux qui font la performance des systèmes de formation. Aussi, nous avons décidé d'adopter une vue « ingénierie système » pour l'analyse des systèmes de formation.

Nous décrirons dans un premier paragraphe ce qu'est l'ingénierie système et ce qu'elle englobe puis nous exposerons quelles sont les spécificités liées à l'ingénierie des systèmes de formation ou plus simplement dit « l'ingénierie de formation », thématique développée par l'équipe SdP¹⁹ du LGIPM²⁰ au sein duquel ces travaux de thèse ont été développés.

B. I. L'ingénierie système

a) Définition de l'ingénierie

L'ingénierie d'un système est considérée comme « L'étude globale d'un projet industriel sous tous ses aspects : techniques, économiques, financiers, sociaux, environnementaux,... »²¹.

Le dictionnaire de management de projet édité par l'AFITEP²² et l'AFNOR²³ donne une définition plus complète

19 SdP : Systèmes de Production : Équipe de recherche du LGIPM qui concentre ses recherches sur la modélisation, l'analyse, l'intégration et la conduite des systèmes de production, essentiellement dans le domaine du discret (systèmes à événements discrets).

20 LGIPM : Laboratoire de Génie Industriel et Production Mécanique – adresse du site WEB : <http://www.enim.fr/enim/lgipm/index.php>

21 P. ROBERT, Le Petit Robert 1, 1997

22 AFITEP : Association Francophone de Management de Projet, créée en 1982, elle rassemble un millier de professionnels du management de projet, praticiens, consultants, formateurs, enseignants, chercheurs et étudiants.

23 AFNOR : Association Française de Normalisation - Créée en 1926, elle est reconnue d'utilité publique et est placée sous la tutelle du ministère chargé de l'Industrie. Elle compte environ 3000 entreprises adhérentes. Dans le cadre du décret du 26 janvier 1984, AFNOR anime le système central de normalisation composé de 31

[AFITEP et AFNOR, 2000]:

« L'ingénierie est l'ensemble des activités essentiellement intellectuelles qui ont pour objet d'optimiser l'investissement, quelque soit sa nature, dans son choix des processus techniques de réalisation et dans sa gestion, à savoir en particulier : études préliminaires des possibilités de réalisation ; étude de rentabilité; détermination des meilleurs moyens de conception ; établissement des avant-projets, des plans d'ensemble et d'exécution, ainsi que des devis estimatifs; préparation des appels d'offre ; coordination et contrôle de la réalisation; assistance technique pour la mise en route, établissement des notices d'exploitation, formation du personnel. »

b) Définition de l'ingénierie système

L'AFIS²⁴ définit un système comme ceci :

« Un système est décrit comme un ensemble d'éléments en interaction entre eux et avec l'environnement, intégré pour rendre à son environnement les services correspondants à sa finalité. »

L'AFIS toujours propose une définition générale pour l'ingénierie système (IEE P1220-1994) [GT IS, 2004]:

« Approche coopérative interdisciplinaire pour le développement progressif et la vérification d'une solution pour le système, équilibrée sur l'ensemble de son cycle de vie, satisfaisant aux attentes d'un client et acceptable par tous. »

Cette définition introduit deux notions importante : le cycle de vie du système et la satisfaction des attentes du (des) client(s).

D'après la norme ISO15288, le Cycle de Vie du Système est l'« **évolution d'un système étudié dans le temps, depuis sa conceptualisation jusqu'à son retrait** ». Cette notion peut évidemment être étendue au cycle de vie produit et donné lieu à tout un pan de l'ingénierie, la PLM (Product Lifecycle Management). Nous aurons l'occasion de montrer qu'une formation connaît un cycle de vie et nous introduirons la notion de maturité.

En ce qui concerne la satisfaction du ou des clients, c'est bien sûr une des priorités du système car c'est sa raison d'être. Aussi, il est fondamental d'identifier l'ensemble des clients d'un système, qu'ils soient internes ou externes au dit système. Fort de cette connaissance, il sera possible de mettre en place des processus d'ingénierie pour la conception du système et de ses produits. Cette notion appelle celle d'ingénierie des exigences.

L'ingénierie des exigences regroupe les activités d'identification, de structuration et de représentation des besoins utilisateurs vis à vis d'un système. Le but de cette démarche est d'assurer la cohérence entre ces besoins et les fonctionnalités du système. Nous avons donc des modèles de l'existant et pouvons travailler sur de nouvelles versions du modèle - cibles - pour exprimer et documenter les exigences et montrer les étapes - trajectoire - pour y arriver. Nous identifions, dans la partie qui suit, les différents clients que compte un système de formation.

bureaux de normalisation sectoriels, des pouvoirs publics et de 20 000 experts. AFNOR est le membre français du CEN et de l'ISO et assume les responsabilités attribuées à la France à ce titre.

24 AFIS : Association Française d'Ingénierie Système. Créée en 1999, elle a pour but la promotion de l'Ingénierie Système par la présentation et l'explication de ses principes et de son approche multidisciplinaire en vue de la réalisation de systèmes complexes réussis.

La Figure 10 représente l'ingénierie des exigences au cœur du processus de conception.

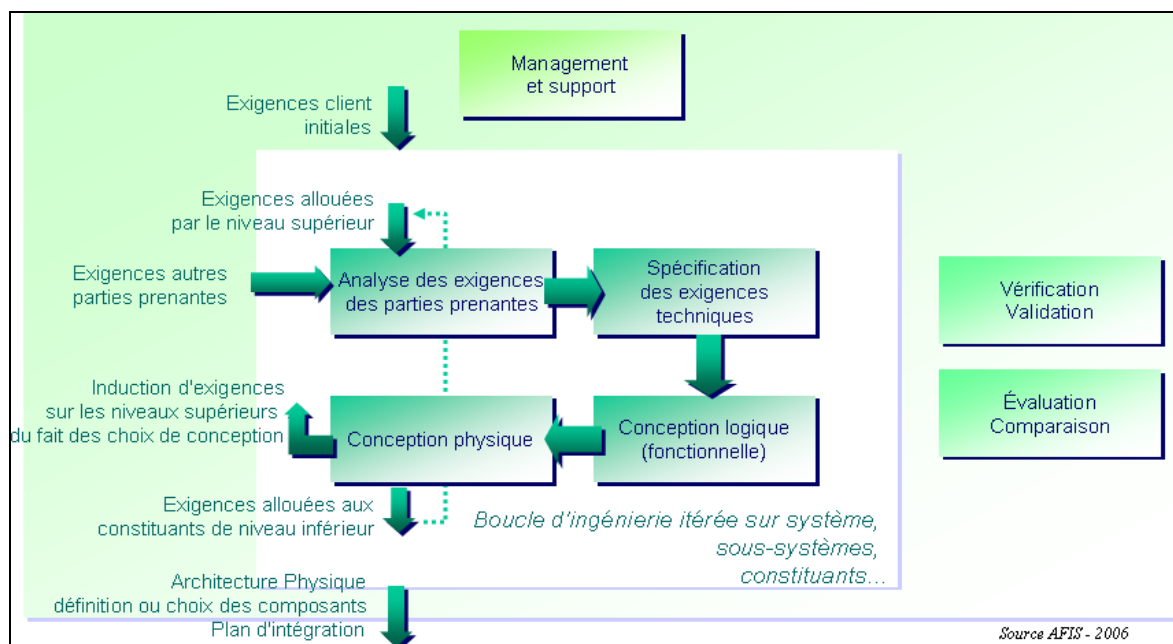


Figure 10. Positionnement de l'ingénierie des exigences au cœur de processus de conception

La démarche technique de l'ingénierie système faisant passer du besoin à la définition de la solution se traduit par un processus itératif :

- d'exploration du problème et de spécification de la solution conduisant à des visions prescriptives du système, puis de ses sous-systèmes et constituants, sous forme d'ensembles d'exigences auxquelles ils devront satisfaire ;
- de conception conduisant à des modèles constructifs sous forme d'architectures : architecture fonctionnelle et architecture de constituants avec leurs exigences spécifiées de réalisation, d'intégration, de vérification et validation ainsi que de maintenance.

L'aspect itératif est dû à la complexité du problème global :

- on ne peut définir d'emblée l'ensemble des besoins et contraintes de toutes les parties prenantes constituant le problème : on part des exigences initiales des parties prenantes utilisatrices et exploitantes du futur système (satisfaction du client), et au fur et à mesure des choix de conception on adjoindra les exigences des autres parties prenantes (système, sous-système, équipementiers, développeurs, producteurs, vérificateurs, intégrateurs, maintenanciers) ;
- on ne peut trouver directement une solution au problème global, aussi le décomposera-t-on itérativement en sous-problèmes (décomposition en blocs constitutifs) en tenant compte de leurs interactions, jusqu'à ce que ces sous-problèmes soient suffisamment simples pour leur trouver des solutions potentielles (composants existants ou à développer). On est alors ramené à un problème d'intégration de ces solutions, préparé par la définition de l'architecture.

c) Typologie des projets d'ingénierie

L'ingénierie système revêt de nombreux aspects. Nous pouvons, pour tenter de dresser une typologie, nous appuyer sur le modèle canonique système opérant – système d'information - mémorisation et du système de conduite [LE MOIGNE J-L., 1994] qui constitue un des principes de base de certaines méthodes de modélisation. Cette typologie des projets d'ingénierie peut-être basée sur l'identification de l'ampleur et de la spécificité des problèmes d'ingénierie que l'on est amené à résoudre. Ce sont :

- **L'ingénierie de l'objet** produit par le sous-système de conception du système opérant ;
- **L'ingénierie du système opérant** en liaison avec l'ingénierie de l'objet, elle consiste en la spécification des tâches, des acteurs et des processus chargés de la transformation de l'objet primaire en objet technique produit par le système. Dans certains cas, on concevra également les processus de soutien (logistique, maintenance, *etc.*) ;
- **L'ingénierie du système d'information** qui se focalise sur l'identification des flux d'informations et la gestion de leur traitement ;
- **L'ingénierie du système de management** ou de pilotage dans laquelle on trouve des préoccupations relatives à la gestion des ressources, la gestion des compétences et des connaissances. L'axe pilotage inclut quant à lui la définition de la stratégie et la satisfaction des exigences liées au système. (Nous illustrerons la prise en compte de cette fonction par l'utilisation de l'ingénierie des exigences) ;
- Actuellement dans les entreprises et, plus généralement, les organisations de toutes natures, on parle également d'**ingénierie du système de mesure/évaluation** dont l'objectif est de déployer la stratégie par la spécification des objectifs opérationnels des contraintes et des indicateurs de performance.

B. II. Spécificités de l'ingénierie des systèmes de formation

Notre ambition étant de traiter un système de formation à l'instar d'autres systèmes, nous nous sommes inspirés de la typologie des projets d'ingénierie concernant l'ingénierie système. L'analogie est exemplaire lorsque nous considérons un système de formation comme un système de production de services. Nous détaillons au chapitre 2 cette approche orientée services. Ainsi, nous nous identifions les bénéficiaires des systèmes de formation ou autrement désignés comme nos clients. Forts de cette identification, nous posons les premiers jalons de la définition de la stratégie des systèmes de formation et les facteurs clés associés.

a) Analogies des systèmes de formation avec les systèmes de production de biens et de services.

L'ingénierie des systèmes étant particulièrement adaptée à la définition des systèmes complexes, nous reprenons la typologie existante des projets d'ingénierie pour les systèmes de production de biens et de services. En effet, les systèmes de formation peuvent être assimilés à des systèmes de production de services dans la mesure où ils offrent, entre autres, des services de formation à leurs clients que sont les apprenants (élèves, étudiants, professionnels, *etc.*). La spécificité essentielle des systèmes de formation réside dans le fait que le client

est coproducteur du service qu'il reçoit. En effet, chaque être humain dispose de sa propre sensibilité face au processus d'acquisition de compétences. Aussi faudra-t-il rester prudent lors de l'identification des genericités dans le processus de formation en tant que tel. D'autres systèmes bien connus ont un comportement assez similaire : les systèmes hospitaliers [ARTIBA A. et al, 2004a]. Nonobstant, l'analogie avec les systèmes de production de services est tout à fait cohérente [POURCEL C., 2005] et permet d'inscrire pleinement les systèmes de formation à travers la typologie des projets d'ingénierie comme illustré par le Tableau 14.

Type de projet d'ingénierie	Système de Formation ou de Production de Compétences
Ingénierie de l'objet	Spécification des formations à dispenser
Ingénierie du système opérant	Spécifications des tâches, des acteurs et des processus de recrutement, de formation et de qualification
Ingénierie du système d'information	Spécifications des tâches, des acteurs et des processus de traitements des informations, des données et des connaissances
Ingénierie du système de management, pilotage	Spécification des procédures de gestion des ressources, des compétences et des connaissances et de définition de la stratégie
Ingénierie du système de mesure et d'évaluation des performances	Spécification des objectifs et des indicateurs de performances
	Spécifications des tâches, des acteurs et des processus de mesure et d'évaluation des performances

Tableau 14. Typologie des projets d'ingénierie adaptée aux systèmes de formation

On remarque à la lecture de ce tableau que les systèmes de formation s'adaptent parfaitement à la typologie proposée pour les systèmes d'ingénierie. On constate également que l'ingénierie objet nous oriente vers la spécification des objets (ici des formations) en intégrant les attentes exprimées par les clients du système de formation afin de pouvoir les satisfaire au mieux quant à la nature des services proposés. D'autres éléments nous conduisent à identifier nos clients dans la mesure où ces derniers seront particulièrement sensibles, non seulement à la qualité des services de formation proposés, mais également aux coûts que représentent ceux-ci et aux délais qui leur sont associés. Or, les coûts et délais seront certes impactés par la spécification du produit mais également sur la spécification du process.

b) Identification des clients des systèmes de formation

L'ingénierie système nous invite à considérer comme prioritaire la satisfaction des clients dudit système. Aussi, il nous est fondamental d'identifier avec précisions le ou les clients des systèmes de formation afin de pouvoir au mieux être à l'écoute de leurs attentes et les satisfaire. Nos travaux d'observation sur la situation des systèmes de formation à l'échelle mondiale ont mis en évidence l'existence de trois clients distincts que sont [BISTORIN O. *et al*, 2005]:

- **L'apprenant** : sa satisfaction est essentielle à la survie du système de formation. En effet, sans apprenants à former, le système perd toute nature d'existence ;
- **L'organisme recruteur** : nous ne devons pas perdre de vue que pour les établissements de l'enseignement supérieur, notre client reste les entreprises. Aussi, le système doit pouvoir lui fournir des apprenants

conformes à ses objectifs en termes de référentiels de compétences. Dans le cas de systèmes de formation n'ayant pas comme client l'entreprise car étant « au milieu » de la chaîne de formation, nous considérerons que le client est le système de formation aval, à-même de spécifier un référentiel de compétences attendues. En outre, la société en général est également considérée comme organisme recruteur dans la mesure où cette dernière participe à la définition des compétences permettant d'évoluer dans la société en tant que citoyen ;

- **L'organisme payeur** : dans de nombreux cas, les systèmes de formation sont financés dans leur grande partie par l'État ou les collectivités locales. Le système doit donc conférer un rayonnement important à l'échelle locale, nationale ou internationale en « contre partie » des ressources financières octroyées.

c) Identification de la stratégie des systèmes de formation

Afin de satisfaire ses clients, le système de formation doit se doter d'une réelle stratégie et y associer des facteurs clés de succès pertinents.

Les référentiels du système de formation

La notion de référentiel d'entreprise renvoie à la réunion d'informations ou d'éléments susceptibles d'influencer la conception des processus métier de l'établissement. Les référentiels contiennent des définitions, des recommandations ou des exigences, provenant de l'établissement ou d'organismes externes.

Le premier référentiel formalisé est le référentiel métier qui fournit aux participants du projet une terminologie commune. Ce référentiel peut prendre la forme d'un glossaire, structuré ou non, qui sera transmis ultérieurement à l'équipe projet de manière à ce qu'elle maîtrise les termes métier et puisse mieux traiter les exigences formulées. Dans le cadre d'un l'établissement de formation, nous nous sommes appuyés pour cela sur LHEO (Langage Harmonisé d'Échanges d'informations sur l'Offre de formation), issu en partie des normes AFNOR « Terminologie de la Formation Professionnelle » (NFX 50 -750 et NFX 50 - 751)

Nous avons ensuite identifié d'autres types de référentiels :

- Lois, normes, réglementations, directives des organismes de tutelles. Exemple : la CTI²⁵ habilite les écoles à délivrer un titre d'ingénieur mais exige en contrepartie le respect d'un certain « standard de formation » ;
- Référentiels de compétences attendus par le client ;
- Carte des risques ;
- Bonnes pratiques pédagogiques, pouvant être rattachées à un processus pédagogique. Elles ne seront pas modélisées ni documentées dans un premier temps.

Facteurs clés de succès, objectifs et indicateurs

Les réflexions sur le déploiement de la stratégie sont de tout temps, cependant certains considèrent que le livre de référence de la méthode est celui de R.S.Kaplan et D.P.Norton [KAPLAN R. et NORTON D., 2003]. Les auteurs proposent de s'écarter de l'approche comptable classique et d'évaluer la stratégie

25 CTI : Commission des Titres de l'Ingénieur, organisme d'évaluation et d'habilitation des formations d'ingénieurs, a comme objectif principal l'amélioration continue de ces formations, en vue d'atteindre un haut degré de la qualité de ces formations.

de l'entreprise selon quatre axes : financier, clients, processus internes et apprentissage organisationnel.

La réflexion sur la stratégie de l'établissement est menée selon la démarche suivante : élaboration du modèle stratégique, élaboration du modèle des Facteurs Clés de Succès, élaboration du modèle cause – effet, définition des objectifs stratégiques et opérationnels, définition des plans d'action [ARTIBA A. *et al*, 2004b].

L'objectif est la traduction d'un facteur clé de succès du système considéré, dont la signification est précisée par la définition ci-dessous. La norme ISO 8402 précise qu'un indicateur est une « information choisie, associée à un phénomène, destinée à en observer périodiquement les évolutions au regard d'objectifs préalablement définis ». À titre d'exemple nous avons défini les objectifs suivants :

- « Atteindre l'efficacité du système » ;
- « Améliorer notre image de marque » ;
- « Aligner le système d'information avec les exigences utilisateurs » ;
- *etc.*

Parmi ces différents objectifs stratégiques, l'un d'entre eux, « Être capable de réagir aux nouveaux besoins en adaptant les formations », a déclenché une réflexion et des travaux dont entre autre, cette thèse de doctorat. La Figure 11 représente la stratégie globale des systèmes de formation et les facteurs clés de succès associés. Elle est établie à partir du logiciel ADOScore de la société BOC GmbH avec laquelle notre équipe de recherche a développé un partenariat particulier. Aussi, nous reprenons l'approche proposée par Kaplan et Norton et pour chaque axe de performance, associons des facteurs clés de succès spécifiques. Nous pouvons également préciser que d'autres travaux au sein du laboratoire LGIPM se sont focalisés plus précisément sur la conception et la déclinaison de la stratégie au sein des systèmes de formation.

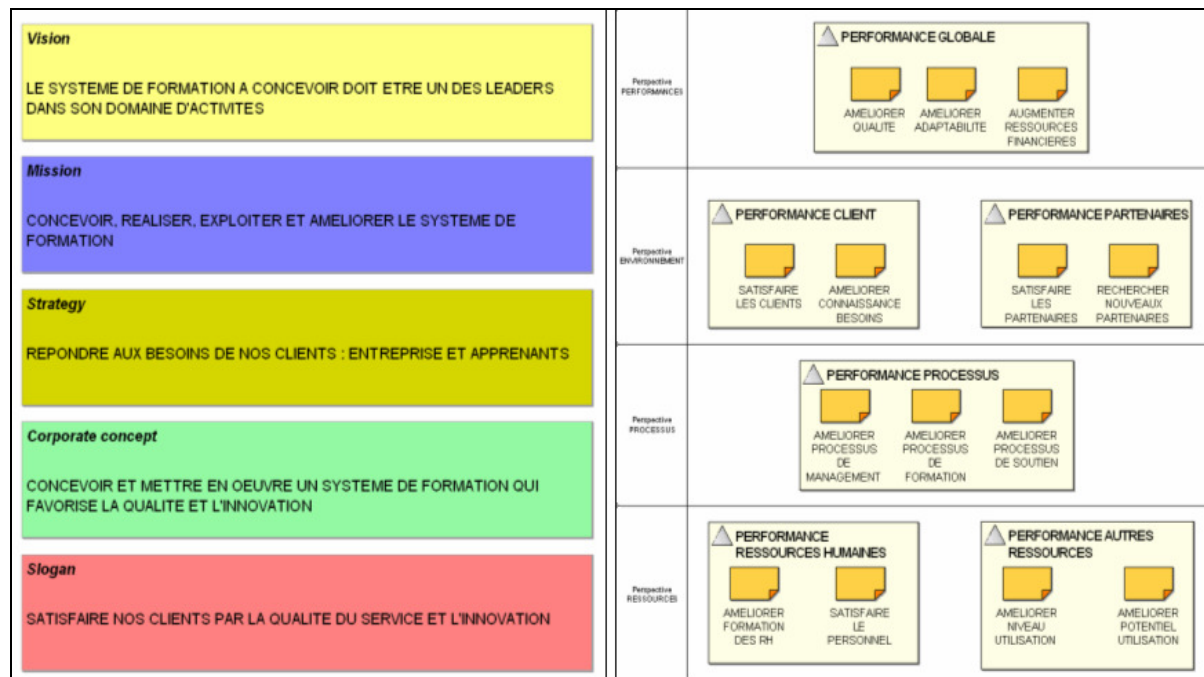


Figure 11. Stratégie et facteurs clés de succès des systèmes de formation

C. État de l'Art des travaux sur le processus de formation

Afin de tenter de proposer de nouvelles méthodes et de nouveaux outils pour l'aide à la conception des systèmes de formation, nous avons cherché à connaître le positionnement de la recherche scientifique autour du processus de formation tant pendant la phase de conception et spécification des formations que dans la phase de mise en œuvre de ces formations. Ce sera pour nous l'occasion de positionner nos travaux et de justifier ainsi la pertinence de ceux-ci dans un contexte où pour une partie, les développements réalisés par des sociétés privées sont plus nombreux et parfois plus pertinents que ceux observés dans les environnements de recherche universitaire.

C. I. Spécification – Conception

L'ingénierie de formation, face aux constats autour des systèmes de formation actuels, a montré l'importance de la satisfaction client. Aussi, il est fondamental de s'attarder sur la conception ou la re-conception d'une formation afin que celle-ci réponde au mieux aux attentes de ceux qui vont la « subir », les apprenants, mais également de ceux qui en seront consommateurs indirects, par exemple les industriels employant les apprenants ayant suivi ces formations. Aussi, nous présentons les travaux autour de la conception des formations. Cette démarche s'inscrit pleinement dans l'innovation au sein des systèmes de formation et fait partie intégrante du quatrième modèle d'innovation, actuel depuis 2001, comme le précise F. Cross [CROSS F., 2004]. Toutefois, il nous faut distinguer deux aspects de l'innovation intervenant dans la conception d'une formation [LE BOTERF G., 1999] :

- L'ingénierie des dispositifs de formation qui aboutit à des cahiers des charges permettant un ensemble cohérent de dispositifs et de moyens nécessaires à la formation (référentiels de métiers ou de compétences, textes législatifs ou réglementaires,... ;
- L'ingénierie pédagogique qui est du ressort des prestataires de formation et définit les objectifs locaux, les progressions et les modalités d'apprentissage.

Il est bien sûr évident que nous nous sommes focalisés sur le premier point dans la mesure où une grande partie de l'ingénierie pédagogique relève du domaine des sciences de l'éducation qui s'attache essentiellement aux méthodes de formation.

a) Formalisation de la demande : référentiels de compétences ou métiers

Il est important de rappeler à ce stade que nous avons choisi de centrer nos recherches sur les systèmes de formation à vocation professionnalisante (dont l'issue logique est la vie active) car leur finalité est aisément exprimable par le biais de référentiels de compétences dédiés à une activité professionnelle. Aussi, cela concerne en grande partie la formation supérieure. Le ministère de l'Éducation Nationale français reconnaît l'augmentation de la professionnalisation dans l'enseignement supérieur allant jusqu'à évoquer un facteur quatre entre 1980 et 2000 dans l'offre de formation professionnalisante [CEREQ, 2003].

De surcroît, on constate une volonté dans la professionnalisation des formations, conscient de leur intérêt socioconstructiviste et fortement encouragé par le secteur de l'emploi [MOREAU G., 2002] [JONNAERT P., 2002].

On constate également que les formations à vocation professionnalisante contribuent activement à éviter une pénurie en personnel qualifié, même si cette professionnalisation n'est pas le seul facteur incident [COHEN E., 2006].

Outre la professionnalisation des formations, on observe dans l'industrie de bien ou de services qu'on accorde une place importante à la notion de connaissances/compétences. C'est le cas notamment lorsqu'on traite de la conduite du changement et la maîtrise des compétences de l'entreprise comme présenté par exemple par Jean Pierre VAUDELIN et Olivier DEWISE [VAUDELIN J-P. et DEWISE O., 2004]. Dans ce cadre, on parle de management des connaissances ou des compétences (Knowledge - skills management). Cette réflexion par les compétences est également observée pour le recrutement des ressources humaines et comme le remarque Cédric FRETIGNE, *les employeurs entrent dans une logique de recrutement en termes de compétences beaucoup plus que de qualifications* [FRETIGNE C., 2004].

Fort de ces différents constats, les systèmes de formation ont évolué dans leur prise en compte de la demande en introduisant l'Approche Par Compétences ou APC, venue se substituer à la Pédagogie Par Objectifs (PPO)[HAMELINE D., 1979]. Ainsi, le concept de qualifications a été supplanté par celui de profil de compétences (traduit sous forme de référentiels de compétences), lequel met en relief l'adaptabilité, la mobilité et le sens de l'initiative [MILED M., 2005].

Au sujet de l'approche par compétences, les travaux de Guy le BOTERF sont riches d'enseignement. Cela nous permet notamment de poser le cadre conceptuel de ce que l'on entend par compétence. La compétence est un ensemble de savoirs, savoirs-faire et savoirs-être qui se manifestent dans la réalisation efficace d'une tâche avec un certain niveau de complexité, professionnelle par exemple. De plus, les compétences peuvent être individuelles ou collectives par coopération entre compétences individuelles [LE BOTERF G., 2006a].

La combinaison de l'approche par compétences avec d'autres méthodes ou référentiels comme le cadre européen de qualifications permet la définition d'un petit nombre de compétences de manière complexe et concrète, en référence à un projet de formation de l'institution, lui-même en référence à un projet de société en phase donc avec les attentes du monde professionnel [ROEGIERS X., 2006].

Toutefois, alors que l'APC semble apporter des résultats tout à fait probants pour la constitution de référentiels métiers basés sur les compétences, de nombreux organismes ont développé des référentiels métiers tout aussi satisfaisants pour les professionnels mais en s'écartant de l'approche scientifique qui caractérise l'APC. C'est le cas par exemple de l'ANPE²⁶ en France ayant mis en place les référentiels métiers ROME²⁷ permettant de disposer d'une quantité importante de référentiels métiers reconnus par le monde professionnel. En revanche, on constate parfois une grande disparité d'un référentiel à l'autre pour un même métier. C'est par exemple le cas avec les référentiels utilisés pour la VAE²⁸ dans les universités et écoles. En effet, afin de pouvoir constituer les dossiers VAE des candidats, les universités et écoles ont dû se livrer à

²⁶ ANPE : Agence Nationale Pour l'Emploi. Elle a pour mission principale de favoriser la rencontre entre l'offre et la demande d'emploi, d'aider les demandeurs d'emploi à retrouver un emploi et d'aider les employeurs à recruter.

²⁷ ROME : Répertoire Opérationnel des Métiers et des Emplois. Recense plus de 460 fiches emplois qui recompile l'ensemble des compétences attendues pour l'exercice de celui-ci. Créé en 1974, le ROME évolue chaque année.

²⁸ VAE : Validation des Acquis de l'Expérience. La VAE permet de faire reconnaître son expérience (professionnelle ou non) afin d'obtenir un diplôme, un titre ou un certificat de qualification professionnelle. Elle peut donner lieu à l'usage de la formation continue pour mise à niveau.

l'établissement de référentiels de compétences correspondant, sinon aux métiers proprement dits, aux formations permettant l'accès à ces métiers. Cette démarche n'ayant pas fait l'objet d'une coordination, on se retrouve avec des différences importantes qui ont malheureusement tendance à décrédibiliser la démarche VAE.

b) Profil des apprenants entrants

Lors de la conception d'une formation, il est essentiel de s'interroger sur le profil des apprenants qui auront à intégrer la formation. Toutefois, nous observons de façon majoritaire que cette étape n'est que peu voire pas réalisée. En effet, on préfère, plutôt que d'auditer le niveau de compétences/qualifications de l'apprenant entrant, spécifier un référentiel minimum nécessaire à la bonne appréhension des contenus de formation. On retrouve cette notion dans la fiche « Comment élaborer un cahier des charges » (pour une formation) où il est important de s'assurer de « la compatibilité du public par rapport aux objectifs (niveaux, scolaires, niveaux hiérarchiques, secteurs,...) » [LE BOTERF G., 2006b]. Cette logique, même si elle est simple à mettre en œuvre, possède ses limites et notamment dans l'enseignement supérieur ou professionnel où l'hétérogénéité des profils de compétences/qualifications des apprenants est importante. En revanche, nous pouvons noter que dans le cas de formations dématérialisées (non en présentiel, FOAD²⁹, e-learning, CNED³⁰, etc.), l'adaptation au profil de l'apprenant est relativement commune. Cette capacité à augmenter le degré de personnalisation s'explique par des ressources humaines et techniques différentes de celles utilisées dans les formations en présentiel. Il est évident qu'il existe un lien étroit entre le degré de personnalisation des formations et le fonctionnement d'un système de formation, qu'il s'agisse d'aspects financiers, humains, techniques ou organisationnels. Il s'agit donc de trouver un compromis comme le précise par exemple le rapport de l'inspection générale au ministre concernant la mise en place des PPRE³¹ [IGEN, 2006]. Alors que la personnalisation de la formation suivant l'axe pédagogique (méthodes d'apprentissages) est un thème générant un grand intérêt de la communauté scientifique, nous regrettons de ne constater qu'un intérêt naissant de notre communauté pour la personnalisation des formations sur un axe organisationnel. Ainsi, en mai 2004, s'est tenue à l'initiative de l'OCDE, une conférence internationale « Personalised learning – The future of public service reform », où ont été abordés ces nouveaux aspects. Enfin, un cabinet spécialisé en ingénierie propose de s'intéresser au profil des apprenants dès la conception des formations et ce, à travers un cahier des charges dédié³².

Pour conclure, il semble que la logique de conception s'oriente vers des parcours à la carte prévalant sur le langage des cursus identiques pour tous [LE BOTERF G., 1997].

²⁹ FOAD : Formation Ouverte et A Distance

³⁰ CNED : Centra National d'Enseignement à Distance : Centre d'enseignement français formant à distance plus de 300 000 élèves/étudiants par an.

³¹ PPRE : Programmes Personnalisés de Réussite Scolaire : prévus dans la loi n°2005_380 du 23 avril 2005 d'orientation et de programme pour l'avenir de l'école, ils visent à permettre à chaque élève l'acquisition du socle commun de compétences défini dans cette même loi par la mise en place, en accord avec l'élève et ses parents, d'un programme d'enseignement personnalisé dans ses contenus.

³² Cf. <http://www.ingenierie-formation.fr>

c) Construction du curriculum de formation

Une fois définis les états de début et de fin de formation, il est légitime de s'interroger sur le comment faire passer les apprenants d'un niveau de compétences à un autre par le biais de la formation. Le domaine des sciences de l'éducation s'est largement accaparé ce dossier en s'intéressant plus particulièrement aux fonctionnements cognitifs qui régissent l'apprentissage chez l'apprenant. Outre la question de la méthode d'acquisition des compétences, il reste d'autres préoccupations auxquelles il faut répondre : Quels contenus présenter ? L'ordre de présentation de ces contenus est-il important ?...

Sur ces questions malheureusement, la communauté scientifique s'est peu exprimée mais il semble que trois problèmes liés à la conception du curriculum soient mis en avant.

Le premier problème constaté est celui qui vise à la conception du curriculum en fonction des capacités en ressources (humaines, techniques, financières) du système de formation. Par exemple, le volume horaire annuel de la matière X sera déterminé par le fait que l'on dispose de Y enseignants dont le champ de compétences recouvre la matière X et dont le service horaire annuel est de Z heures. Aussi, la réflexion sur le nombre d'heures nécessaires pour l'acquisition de plusieurs compétences dans une matière n'est plus guidée par les compétences elles-mêmes mais par la possibilité d'être capacitaire au niveau des ressources humaines. Il est évident qu'une telle réflexion n'est pas facteur d'optimisation du curriculum !

Le second problème que nous constatons est celui de la conception du curriculum à « profil nostalgique » [MILED M., 2005]. Ce profil nostalgique réside dans le fait que le concepteur de formation a une tendance naturelle à reproduire lors de sa conception ce qu'il a lui-même connu lorsqu'il était élève étudiant. Ce phénomène a de graves conséquences lorsque le concepteur de formation a subi un parcours de formation non optimum puisque ces « erreurs » se voient ainsi prolongées dans le temps.

Enfin, le dernier problème est celui évoqué par Marc DEMEUSE et Christiane STRAUVEN [DEMEUSE M. et STRAUVEN C., 2006] qui rappellent que le « programme » imposé par les entités de gouvernance est considéré par les enseignants au mieux comme un document utile pour orienter, au pire comme une contrainte insupportable qui pèse sur leurs pratiques et nie leur professionnalisme. De façon générale, on remarque que les préoccupations concernant la constitution des curriculums se focalisent sur un niveau macro dans lequel on va chercher à décrire le curriculum d'un apprenant tout au long de sa vie [FOURNIER P-S., 2004] et non pas seulement au sein d'un système de formation en particulier. Malheureusement, nous évoluons dans un contexte où l'optimum de la somme n'est pas égal à la somme des optima locaux ! Toutefois, des tentatives pertinentes ont été réalisées pour transposer ces modes de fonctionnement macro à une échelle plus petite [ESTEVE M., 2002].

Ainsi, bien que les travaux sur la conception des formations soient nombreux, peu sont orientés sur l'axe organisationnel.

C. II. Réalisation

Dans cette partie, nous cherchons à présenter les travaux de recherche autour de la mise œuvre des formations une fois celles-ci conçues (Cf. C.I). Celles-ci s'interrogent globalement sur l'organisation des formations en intégrant les préoccupations liées aux ressources. Dans un premier temps, nous présenterons ces

problèmes en précisant ce qu'est la problématique de timetabling (création de calendriers d'activités). Ensuite, nous indiquerons en quoi le timetabling au sein des systèmes de formation est de nature hautement complexe. Enfin, nous résumerons les différentes méthodes déjà utilisées pour la résolution des problèmes de générations de calendriers d'activités (emploi du temps).

a) Les problèmes de timetabling

Selon A. Wren, le timetabling est « the allocation, subject to constraints, of given resources to objects being places in space-time, in such a way as to satisfy as nearly as possible a set of desirable objectives³³ » [WREN A., 1996]. Ainsi, le timetabling concerne bien sûr les systèmes de formation pour la création d'emploi du temps ou la gestion de sessions d'examens. Toutefois, cette problématique se retrouve également au sein de nombreux autres systèmes [CUSTERS N. *et al*, 2004]:

- Les systèmes hospitaliers pour l'assignation du rôle des infirmières par exemple [VANDEN BERGHE G., 2002]
- Les systèmes de compétitions sportives pour l'optimisation des déplacements lors de rencontres sportives [BARTSCH T. *et al*, 2002]
- Les systèmes de production de biens industriels pour la gestion d'activités au sein d'un parc machines (Job shop ou Flow shop) [MAUGUIERE P. *et al*, 2005]
- Les systèmes de transports fluviaux, routiers, aériens
- *Etc.*

On remarque ici que le timetabling dédié aux systèmes de formation n'est qu'une petite partie de cet axe de la recherche scientifique. La problématique spécifique des systèmes de formation, telle que nous l'avons constatée dans la partie conception, consistant à une logique de précédences fortes dans certains cas pour l'acquisition de compétences au cours du cycle de formation, nous conduit à nous rapprocher de la communauté scientifique dont les travaux portent sur les RCPSP (Resource Constrained Project Scheduling Problem³⁴). Dans les problèmes de type RCPSP, un ensemble de tâches, également appelées activités ou opérations, doit être ordonnancé en un minimum de temps. Ces tâches sont liées entre elles par des contraintes de précedence, et nécessitent tout au long de leur exécution, une ou plusieurs unités d'une ou plusieurs ressources [GOTHA, 2006]. Cette notion de précédences à inclure constitue une première difficulté à la résolution des problèmes de timetabling des systèmes de formation mais n'est qu'un obstacle parmi tous ceux qui font la complexité de ces problèmes et qui mobilisent tant la communauté scientifique. Nous soulignons que contrairement aux systèmes de production de biens, les activités à ordonnancer au sein des systèmes de formation ne sont pas prédéterminées et constituent des variables du système à résoudre. Cette nuance augmente grandement la difficulté de résolution de ce problème.

³³ Traduction : le timetabling est l'allocation, sujette à contraintes, de ressources données à des objets localisés dans l'espace-temps, de telle manière à satisfaire au plus près un ensemble d'objectifs attendus.

³⁴ Traduction : Problème de Gestion/Planification de Projets à Contraintes de Ressources

b) Complexité des systèmes de formation dans le cadre du timetabling

La complexité des études de timetabling pour les systèmes de formation, si elle est avérée, est toutefois relative à la nature du problème considéré. En effet, en fonction du système de formation, de son fonctionnement, la difficulté liée à la mise en place de timetabling sera variable. Par exemple, en France et dans les établissements d'enseignement pré primaires (école maternelle), les élèves ne disposent que d'un seul enseignant tout au long de l'année scolaire. De plus, pour une même section, tous les élèves suivent le même programme de formation. Enfin, le matériel pédagogique, assigné très fréquemment par classe, est en permanence disponible. Aussi, le problème de timetabling peut rapidement se simplifier par « tout le monde (élèves, enseignant, ressources techniques) doit être là pendant les horaires prévus pour l'enseignement ». Ce rendez-vous est parmi les plus simples au niveau timetabling. En revanche, plus on avance dans la scolarité, plus les problèmes se complexifient. En effet, dans l'enseignement secondaire, pour un même groupe d'élèves, on trouve plusieurs enseignants spécialisés par domaine de compétences. De plus, l'assignation des ressources techniques est elle-aussi variable (changement de salle de classe, usage de laboratoire pédagogique, *etc.*). On imagine aisément que l'ordonnancement des formations à ce niveau est plus complexe alors qu'on a une répétabilité hebdomadaire des emplois du temps. Enfin, la complexité la plus importante est observée pour les systèmes d'enseignement supérieur ou de formation professionnelle qui accentuent les aspects personnalisation de formation (parcours à la carte) mais pour lesquels on observe également que les ressources humaines, par exemple, ont d'autres activités hors formation. C'est le cas en France pour les maîtres de conférences ou les professeurs d'université qui, outre leurs activités d'enseignement, doivent avoir une activité de recherche et éventuellement une activité administrative. Ainsi, les différentes contraintes observées font des systèmes de formation des systèmes où l'implantation de méthodes et outils de timetabling s'avère complexe. Afin de positionner nos travaux, nous avons souhaité lister de façon non exhaustive les contraintes à intégrer dans un système de formation. Ces contraintes pourront être définies comme dures (hard) ou molles (soft) par la suite :

- respect des précédences par domaine de compétences
- respect des précédences par compétence
- intégration des indisponibilités des enseignants, élèves, ressources techniques
- Atomicité du rendez-vous : un enseignant, un élève, une salle, *etc.*
- Gestion de groupes d'étudiants (promo, groupe TD, groupe TP, *etc.*)
- Respect d'une charge horaire par période pour les étudiants, ressources humaines, ressources techniques
- Contraintes pédagogiques (intégration du cycle de vie compétences³⁵)
- Intégration de la capacité des ressources (niveau de compétences des enseignants, capacité matérielles pour les ressources techniques, *etc.*)
- *Etc.*

³⁵ Le cycle de vie d'une compétence repose sur le concept que le degré de maîtrise d'une compétence évolue avec le temps. Lors de son acquisition, le degré de maîtrise est élevé. Avec le temps, celui-ci va baisser par exemple par le non-usage de celle-ci. Aussi, si cette compétence est un pré-requis nécessaire à l'acquisition d'une autre compétence, il est de la responsabilité du système de formation de faire en sorte que le délai séparant les processus d'acquisition de ces deux compétences ne soient pas trop éloignés dans le temps.

Bien sûr, nous n'avons trouvé aucune publication scientifique intégrant l'ensemble de ces contraintes. Toutefois, de nombreuses publications existent intégrant une ou plusieurs contraintes et proposant les méthodes de résolution associées. Nonobstant, la robustesse de ces systèmes est nécessairement affectée puisque toutes les contraintes ne sont pas prises en compte.

Il est important de noter l'existence, pour les systèmes de formation à complexité modérée, de logiciel d'aide à la conception d'emploi du temps permettant la création automatique ou semi-automatique des rendez-vous élèves/enseignants/ressources techniques. C'est le cas par exemple de **visual-timabling** (<http://visual.timetabling.free.fr/>) ou encore de **aSc time tables** (<http://www.asctimetables.com/>). Ces programmes sont d'ores et déjà en fonctionnement dans des systèmes de formation de complexité intermédiaire (répétabilité périodique).

c) De nombreuses méthodes utilisées pour la résolution des problèmes de timetabling dans les systèmes de formation

De nombreuses méthodes de résolution ont été explorées pour traiter les problèmes de timetabling dans les systèmes de formation (qu'il s'agisse de la génération d'emplois du temps ou la planification de sessions d'examens). Ces méthodes sont toutes déclinées de l'ingénierie des systèmes de production de bien et de services et ainsi adaptées aux systèmes de formation. Malheureusement, il nous a été impossible de les valoriser les unes par rapport aux autres dans la mesure où, comme nous l'avons expliqué dans le paragraphe précédent, la complexité des situations étudiées et les contraintes en découlant sont variables d'un problème à l'autre. Au cours de nos recherches, nous avons pu recenser l'usage des méthodes suivantes :

- Programmation par contraintes [CAMBAZARD H. *et al*, 2004]
- Algorithmes génétiques [PERNIZA R., 2006]
- Recherche tabou [JACOBSEN F. *et al*, 2006]
- Algorithme de colonies de fourmis [ELEY M., 2006]
- Réseaux de neurones et algorithmes Tiling [CARRASCO P. *et al*, 2002], [KINGSTON J., 2004]
- Algorithme de recuit simulé [BAY R., 2006]
- Algorithme mémétique [BURKE E. *et al*, 1996]
- Algorithme du système immunitaire artificiel [ROZI MALIM M. *et al*, 2006]
- Méthode GRASP³⁶ [CASEY S. *et al*, 2002]

Cette liste n'est évidemment pas exhaustive en ce qui concerne les différentes méthodes de résolution utilisées pour traiter les problèmes de timetabling dans les établissements de formation. Bien sûr, il est important de préciser que des travaux concernent l'hybridation de plusieurs méthodes parmi celles citées ci-dessus. La pertinence des travaux s'en trouve renforcé par la diminution sensible des temps de calcul associés [MERLOT L. *et al*, 2002].

Enfin, on constate à travers ce rapide état de l'art que la grande majorité des travaux de la communauté scientifique repose sur l'usage d'heuristiques ou méta-

³⁶ GRASP : Greedy Randomized Adaptive Search Procedure : Le principe général de GRASP consiste à utiliser plusieurs fois un algorithme glouton choisissant les variables fixées de manière partiellement aléatoire puis à améliorer les différentes solutions ainsi trouvées grâce à une recherche locale

heuristiques alors que très peu de travaux concernent les méthodes exactes. On peut alors supposer que les problèmes de timetabling au sein des systèmes de formation sont tellement complexes que leur résolution par méthode exacte est impossible en l'état des systèmes de calcul (explosion combinatoire). Toutefois, nous n'avons pas trouvé de publications scientifiques affirmant de façon claire cette théorie et il nous appartient donc de le démontrer.

D. Notre problématique

À partir du contexte et du positionnement de la recherche scientifique face à celui-ci, il nous est à présent possible de jeter les bases de notre réflexion en exposant notre problématique. Ainsi, nous présentons nos objectifs généraux puis les précisons afin de décrire notre démarche. Ainsi, la lecture du chapitre 2 relatant notre contribution s'en trouvera facilitée.

D. I. Objectifs généraux

Nous avons pu constater à travers la présentation du contexte des systèmes de formation que ceux-ci comportent des problèmes importants de fonctionnement surtout liés aux aspects organisationnels. L'ingénierie des systèmes de production de biens et de services a su, au cours de ces vingt dernières années, apporter des solutions concrètes à des problèmes analogues observés au sein des systèmes de production de biens et de services. Or, il est pour le moins surprenant que de telles démarches d'amélioration n'aient pas été entreprises au sein des systèmes de formation. Il est donc nécessaire de mettre en place une culture de l'efficacité au sein de ces systèmes afin de réduire le fossé les isolant d'autres systèmes déjà efficaces ou ayant mis en place des méthodes et outils pour le devenir rapidement. Aussi, dans le cadre de la philosophie de l'ingénierie des systèmes de formation ou plus communément nommée ingénierie de formation, nous souhaitons réfléchir sur la constitution d'une méthode et des outils associés permettant l'aide à la conception des processus opérationnels des systèmes de formation. Nous constatons que la conception des processus opérationnels comporte deux aspects distincts, la spécification et la réalisation. Nous avons donc pour ambition de traiter ces deux aspects et de façon cohérente et intégrée. Dans ce cadre, nos travaux permettront de rapprocher les différentes contributions de l'axe conception où notamment, nous avons constaté que la constitution des référentiels de compétences amont et aval est trop souvent cloisonnée de la programmation des activités d'enseignement à travers le parcours apprenant. Par la suite, nous tenterons de proposer des outils nécessaires à la mise en œuvre des formations et ce, de façon rapprochée avec la conception.

Afin d'exprimer de façon claire l'analogie existante avec les systèmes de production de biens et de services, nous reprenons l'approche de la pyramide décisionnelle [GIARD V., 2003] faisant état des niveaux stratégiques, tactiques et opérationnels auxquels sont respectivement associés les PIC³⁷, PDP³⁸ et MRP³⁹.

³⁷ PIC : Plan Industriel et Commercial : Consiste en l'élaboration de la stratégie du système en fonction de son environnement et notamment des attentes de ses clients.

³⁸ PDP : Plan Directeur de Production : Concerne la tactique des systèmes et s'interroge sur les méthodes et moyens nécessaires pour l'accomplissement de la stratégie et le respect du PIC.

³⁹ MRP : Manufacturing Resource Planning : C'est à ce niveau qu'on associe les ressources techniques, humaines aux processus opérationnels qui permettront de conférer la valeur ajoutée aux produits ou services. L'ordonnancement est réalisé au niveau du MRP.

D. II. Démarche envisagée

Nous présentons ici notre démarche de façon plus détaillée indiquant ainsi la cohérence de celle-ci. Ainsi, la Figure 12 présente une vision générale de nos travaux permettant d'aller de la conception à la mise en œuvre des formations au sein des systèmes de formation.

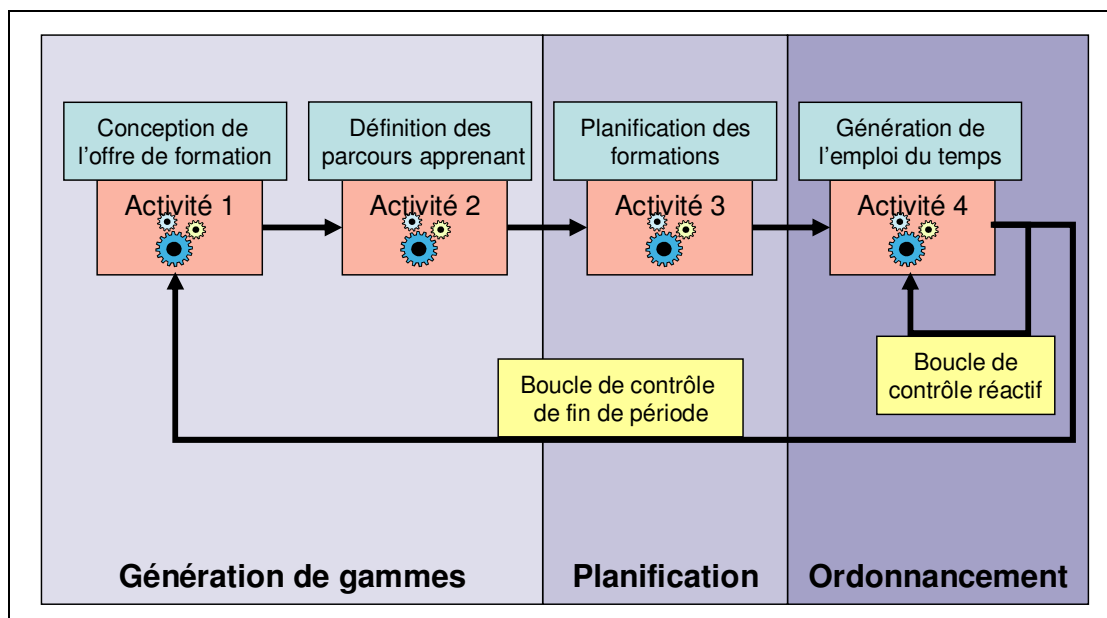


Figure 12. Démarche globale d'ingénierie des processus opérationnels du système de formation

Dans la figure ci-dessus, on peut constater que notre méthode comporte quatre activités coordonnées qui seront détaillées dans le chapitre 2 de ce mémoire. Il est également important de noter la présence de deux boucles de contrôle qui confèrent flexibilité et agilité au système. Dans nos travaux, nous nous sommes intéressés de façon exclusive à la boucle de contrôle de fin de période puisqu'elle englobe tout le processus d'ingénierie des formations. La boucle de contrôle réactif relève plus de la conduite du système opérationnel et est notamment développée dans d'autres travaux au sein de notre laboratoire par, entre autres, les travaux de thèse de Rémi RENAULD.

Tous nos travaux s'appuient sur les fondements de l'ingénierie des systèmes de formation. Toutefois, nous ne disposons pas d'un modèle complet pour la description du système de formation et plus spécifiquement de ses processus opérationnels. Ainsi, nous consacrons une partie de nos travaux à la modélisation du système de formation et notamment au sein des processus opérationnels. Forts de ce modèle, nous entreprenons de dérouler notre méthode globale en y associant au fur et à mesure des outils adaptés présents dans ce mémoire. Cette méthode passe donc par la conception des produits/processus en définissant les services de formation offerts par notre système et en créant les gammes de formation. Ensuite, nous nous attarderons sur la planification globale desdites formations afin de valider la capacité de notre système à assumer ces formations en fonction des apprenants souhaitant y participer. Enfin, nous chercherons à mettre en œuvre ces formations en nous intéressant à l'aspect ordonnancement.

En outre, il nous reste à indiquer que notre contribution s'inscrit pleinement dans les thématiques de notre laboratoire et nos travaux ont été en permanence coordonnés avec ceux affectant d'autres processus tels le processus de pilotage, le processus de mesure/évaluation ou encore le processus de support.

2. Modèle – Démarche

Dans ce chapitre, nous présentons notre contribution scientifique développée à l'occasion de cette thèse. Afin de maîtriser l'organisation des systèmes de formation, nous avons entrepris une étape fondamentale de modélisation. En cohérence avec notre objectif général d'étudier l'opportunité d'une analogie entre les systèmes de formation et les systèmes de production de biens et de services, cette étape de modélisation a été inspirée des méthodes et outils de modélisation existants à destination des systèmes industriels notamment. Forts d'un modèle général cohérent du système de formation, nous présentons sur une représentation détaillée du modèle focalisée sur les processus opérationnels du système de formation, cœur de nos travaux de recherche. Disposant de ce modèle à granularité élevée, nous proposons une démarche générale, associée à des outils, permettant l'aide à la conception de ces processus opérationnels.

A. Modélisation du système de formation

Comme évoqué dans le premier chapitre, les systèmes de formation sont composés d'une structure et d'un fonctionnement complexes. Toutefois, l'analogie est forte avec les systèmes de production de biens et de services [CLEMENTZ C., 2000] et c'est en ce sens que nous nous inspirons des méthodes et outils de modélisation utilisés pour une application dans le cadre des systèmes de production de bien et de services.

Dans un premier temps, nous nous attachons à développer une vue externe des systèmes de formation permettant de mettre en évidence la transformation conférant la valeur ajoutée. C'est également l'occasion de constater que, outre la nécessité de disposer de ressources humaines, techniques, *etc.*, un système de formation est également soumis à des contraintes formalisées par exemple au travers de référentiels imposés par des organismes de tutelle. S'inspirant de la méthode SADT⁴⁰ pour la description des systèmes [LISSANDRE M., 1990], nous proposons une synthèse à travers la vue externe d'un système de formation présenté à la Figure 13.

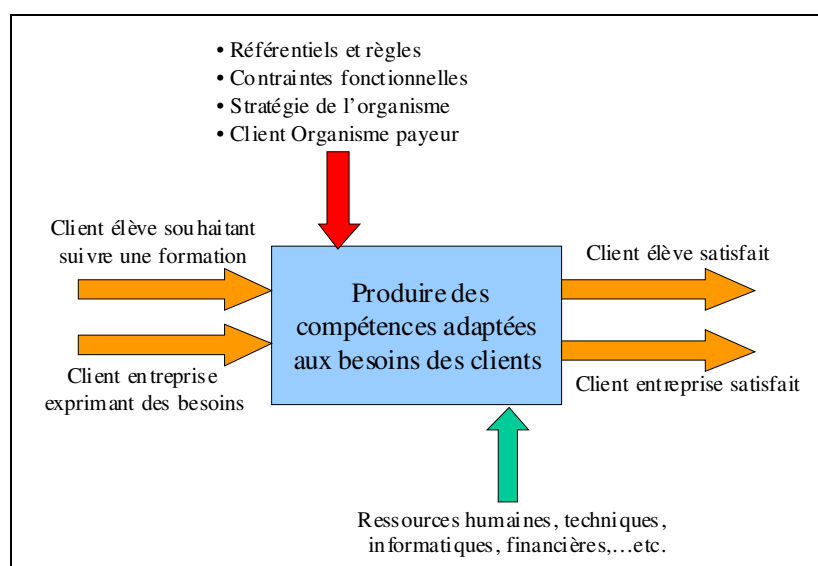


Figure 13. Vue externe du système de formation

⁴⁰ SADT : Structured - Analysis - Design - Technique. - © SADT est une marque déposée de SofTech (USA) et d'IGL Technologie (France)) développée aux USA par Doug Ross en 1977 et introduite en Europe à partir de 1982 par Michel Galiner.

Malheureusement, pour nos travaux, cette vue externe constituant la description générale du système n'est pas suffisante. Nous avons donc besoin d'un niveau de granularité plus élevé pour atteindre la description des processus opérationnels des systèmes de formation. Cette modélisation est donc réalisée en deux étapes. Une première nous permettant d'identifier les différents processus composant le système puis dans une deuxième étape, l'exploration des processus opérationnels afin d'en décrire précisément leur fonctionnement. Pour réaliser ces deux étapes, nous identifions les différentes méthodes et outils associés ayant cours pour l'analyse des systèmes de production de biens et de services. Après un état de l'art non exhaustif de ces méthodes et outils, nous expliquerons en quoi nous avons souhaité fonder nos travaux sur MECI⁴¹, puis orienter la description détaillée des processus opérationnels vers une représentation UML⁴².

A. I. État de l'Art sur la modélisation d'Entreprise, de systèmes de formation

Les méthodes de modélisation des systèmes sociotechniques sont nombreuses et elles se différencient par le point de vue considéré (opérant, information, décision), ou par l'objectif de la modélisation (audit, analyse, conception). Elles sont généralement associées à des méthodes de réingénierie ou de réorganisation [HARZALLAH M., 2000] [POURCEL C. et GOURC D., 2005] :

- Méthodes de réorganisation des gestionnaires, comme, par exemple, la conception d'une structure organisationnelle (conception des postes de travail, conception de la superstructure et conception des liens latéraux) ;
- Méthodes de réingénierie du type BPR⁴³ [JOHANSSON H. *et.al*, 1993] ;
- Méthodes de réorganisation continue : Kaizen, PDCA⁴⁴, TQC⁴⁵ et TQM⁴⁶ ;
- Méthodes issues de la productique : CIMOSA⁴⁷, GIM⁴⁸, AICOSCOP⁴⁹, PERA⁵⁰, GERAM⁵¹, *etc.*

Ces méthodes utilisent des techniques et outils de modélisation comme :

- Des modèles de type « productique » : IDEF0-SADT, IDEF3⁵², CIMOSA, grille GRAI⁵³ ;
- Des modèles de type « sociologues et gestionnaires » : description des postes de travail, modèles de compétences, modèles psycho-cognitifs, *etc.*

D'autres méthodes et outils d'analyse peuvent être considérés comme autant de support aux actions de réingénierie ou de réorganisation :

- Des méthodes de déploiement de la qualité comme QFD⁵⁴ ou de maîtrise de la qualité comme TQC ;

⁴¹ MECI : Modélisation d'Entreprises pour la Conception Intégrée

⁴² UML : Unified Modeling language

⁴³ BPR : Business Process Reengineering , traduction : Réingénierie des Processus d'Affaires

⁴⁴ PDCA : Plan Do Check Act, traduction : Planifier, Réaliser, Contrôler, Capitaliser

⁴⁵ TQC : Total Quality Control, traduction : Contrôle de la Qualité Totale

⁴⁶ TQM : Total Quality Management, traduction : Management de la Qualité Totale

⁴⁷ CIMOSA : Computer Integrated Manufacturing Open System Architecture

⁴⁸ GIM : Grai Integrated Modelling

⁴⁹ AICOSCOP : d'Aide à la COncption de Systèmes de COnduite de Production

⁵⁰ PERA : PURDUE Enterprise Reference Architecture, traduction : Architecture de Référence d'entreprises, université de PURDUE

⁵¹ GERAM : Generic Enterprise Reference Architecture and Methodology, traduction : Méthodologie et Architecture de Référence pour les Entreprises Génériques

⁵² IDEF3 : ICAM Definition Method n°3

⁵³ GRAI : Graphes à Résultats et Activités Interreliées

- On trouve également des aides dans les cercles de qualité et le système de suggestion ;
- Les méthodes d'évaluation de la performance : coût d'obtention de la qualité, coûts et performances cachées, valeur ajoutée directe, analyse de la valeur, *etc.*

En 2002 le Groupe Modélisation d'Entreprise du Groupe de Recherche en Production et l'École des Mines d'Albi Carmaux ont organisé une école de printemps sur ce thème. Cette école a été reconduite en 2004 à Nîmes et en 2006 à Arcachon. Dédiée « Enseignement » elle a permis de présenter les concepts, méthodes et démarches les plus employées dans notre communauté [GT5, 2002] à savoir :

- Un modèle et une architecture de référence : CIMOSA [MHAMEDI A., 2002a] complétée par la méthode ACNOS⁵⁵ [MHAMEDI A., 2002b] ;
- Une méthode dédiée au système de décision : GRAI [VALLESPER B. et DOUGMEINTS G., 2002] ;
- Une méthode dédiée processus : MECI [POURCEL C. et GOURC D., 2005] ;
- Une méthode dédiée pilotage : OLYMPIOS [BRAESCH C., 2002].

Nous ne pouvons ignorer que d'autres approches sont possibles comme, par exemple, la méthode plus générale SADT [LISSANDRE M., 1990] [PIERREVAL H., 1994] ou encore OSSAD⁵⁶, méthode dédiée système d'information et organisation qui a pour objet principal l'analyse et la gestion des problèmes organisationnels induits par l'arrivée des nouvelles techniques de l'information et de la communication (projet N° 285 du programme ESPRIT) [POURCEL C. et GOURC D., 2005].

Nous nous sommes donc orientés pour le développement de nos travaux vers MECI car cette méthode est naturellement dédiée processus et couvre ainsi tout le spectre des éléments constitutifs d'un système de formation. En effet, outre la préoccupation de formaliser les processus opérationnels des systèmes de formation, l'ensemble de l'équipe de recherche SdP du LGIPM nécessitait une vision des autres processus intervenant au sein du système de formation afin de pouvoir traiter d'autres problématiques liées aux systèmes de formation comme par exemple la mesure de la performance au sein de ces systèmes ou encore son pilotage réactif.

A. II. Modélisation MECI

À la lecture de la vue externe du système de formation présentée au début de ce chapitre, nous mettons en avant la création de valeur ajoutée au sein de notre système de formation. Cette valeur ajoutée confirme la présence de processus opérationnels ou autrement dénommés de transformation d'objets. Toutefois, la prise en compte de référentiels extérieurs à respecter implique nécessairement l'existence de processus de pilotage couplés à des processus de mesure pour disposer d'une boucle de contrôle. Enfin, la nécessité de disposer de ressources pour la transformation des produits appelle la notion de processus support, fournisseur de ressources.

Toutefois, à ce stade il ne s'agit que de conjectures et c'est pour explorer ces hypothèses que nous nous sommes inspirés d'une méthode de modélisation dédiée processus ayant son origine dans les systèmes de production de biens et de services.

Afin de pouvoir identifier clairement les activités et processus développés au sein d'un système de formation, nous mettons en œuvre la méthode de modélisation

⁵⁴ QFD : Quality Function Deployment

⁵⁵ ACNOS : Intégration des activités non structurées dans la modélisation des systèmes de production

⁵⁶ OSSAD : Office Support Systems Analysis and Design, traduction : Analyse et Conception des systèmes de supports professionnels

MECI. Cette méthode, assez récente, a eu l'occasion de démontrer sa pertinence pour la création de modèles au sein de systèmes industriels mais pas uniquement, puisqu'elle est notamment à l'origine de travaux sur les systèmes hospitaliers, systèmes complexes également [ARTIBA A. *et al*, 2004a].

La méthode de modélisation MECI propose deux méta-modèles :

- Le méta-modèle fonctionnel, présenté à la Figure 14, repose sur l'identification des tâches, acteurs, ressources, processus et environnement. [POURCEL C. et GOURC D., 2005] ;

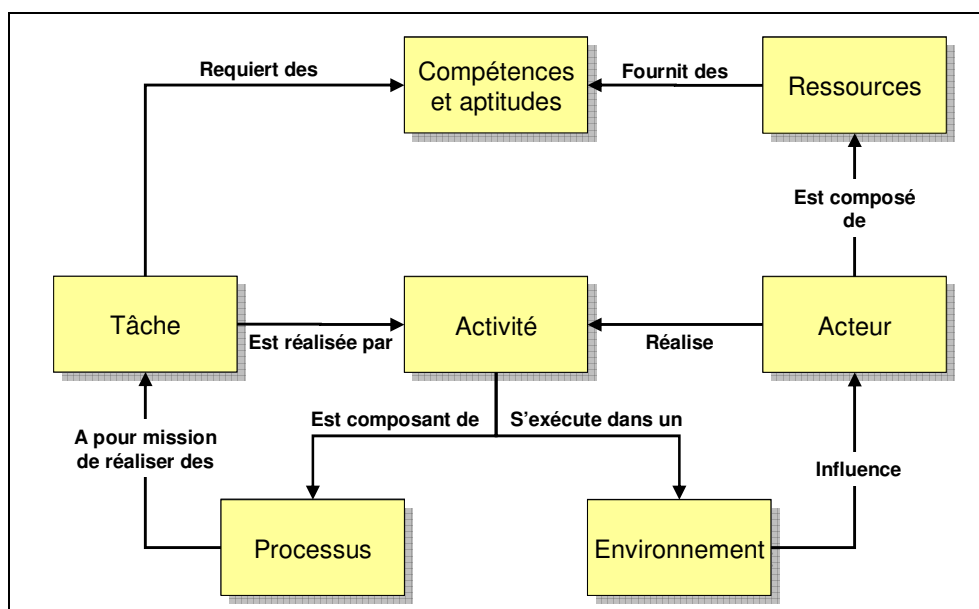


Figure 14. Méta-modèle fonctionnel MECI

- La vue interne d'une unité organisationnelle, que nous présentons à la Figure 15, permet d'établir la constitution d'un système et d'indiquer quels sont les liens existants entre ses différents constituants. Cela permet entre autre la maîtrise des flux qu'ils soient matériels ou immatériels (d'informations par exemple).

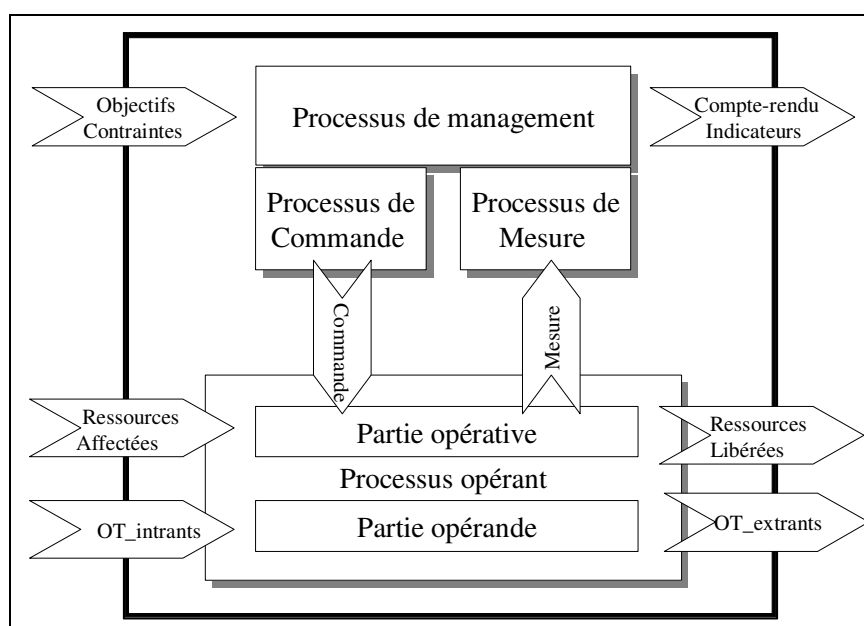


Figure 15. Vue interne de l'unité organisationnelle MECI

Par le biais de la mise en œuvre de la méthode MECI, nous présentons ici les différents processus et relations inter processus identifiés dans le cadre d'un système de formation. L'analogie est forte avec le modèle générique des systèmes de production de biens et de services. Inspirés de MECI, nous pouvons donc décrire l'existence des processus opérationnels (incluant le processus d'ingénierie ou ré ingénierie des services et le processus de formation), du processus de soutien, du processus de management/pilotage et du processus de mesure évaluation. Les relations inter processus font état des flux d'informations échangés entre ces processus. Une synthèse est ainsi présentée à la Figure 16.

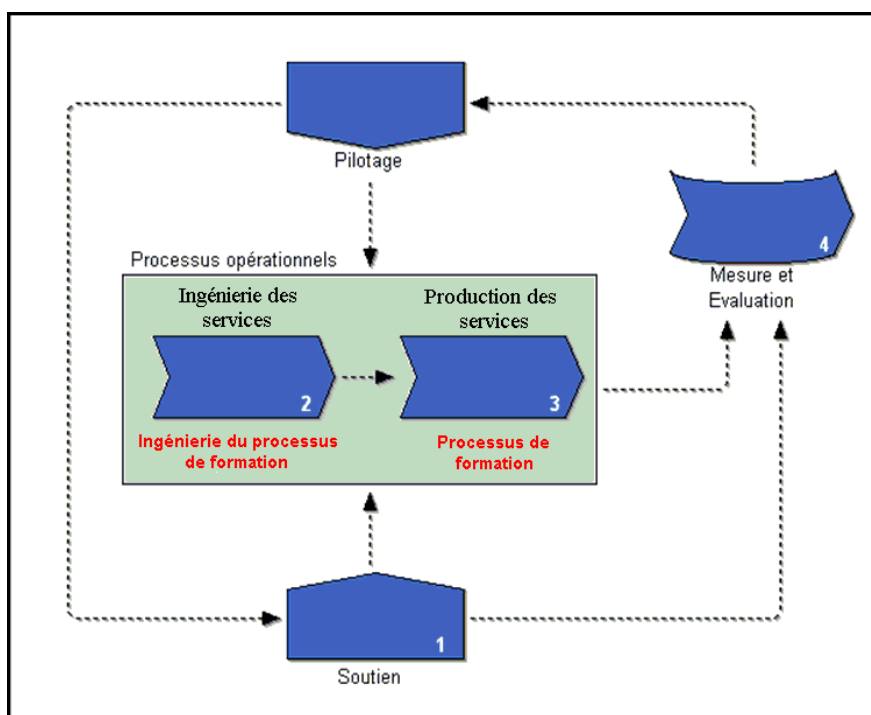


Figure 16. Vue des processus et des liens entre ceux-ci du système de formation selon MECI

D'après la figure ci-dessus, nous avons pu identifier des activités au sein de quatre processus généraux que sont :

- **Les processus opérationnels** : C'est par le biais de ces processus que l'on confère la valeur ajoutée aux produits de notre système. En l'occurrence, dans le cadre du système de formation, on trouve deux processus opérationnels. Le premier, le **processus d'ingénierie des services de formation** participe à la définition des formations. Ainsi, la conception des services de formation crée t'elle de la valeur ajoutée au sein de notre système. Le second processus opérationnel n'est autre que le **processus de formation** en tant que tel au sein duquel l'apprenant est bénéficiaire d'un accroissement de compétences. Il y a transformation et donc valeur ajoutée ;
- **Le processus de soutien ou support** : Ce processus assure le traitement des ressources nécessaires au déroulement des processus opérationnels. Ainsi, il assume, l'acquisition, la maintenance, la mise à disposition et enfin la relaxation de l'ensemble des ressources ;
- **Le processus de mesure/évaluation** : Il assure la mesure au sein des processus opérationnels et de soutien. Ces mesures peuvent être agrégées pour former des indicateurs qui seront relayés vers le processus de pilotage ;

- **Le processus de pilotage** : Il assure la conduite externe des processus opérationnels et de soutien du système de formation en assurant notamment la définition de la stratégie globale du système. La mise en œuvre de la stratégie, déclinée en facteurs clés de succès, est contrôlée par le retour assuré par le processus de mesure/évaluation.

Forts de cette cartographie globale des processus du système de formation, nous nous attachons à développer des modèles partiels de ce système. La complexité des processus opérationnels nous conduit à nous préoccuper dans un premier temps de la modélisation de ceux-ci. De surcroît, nos travaux de thèse se focalisent essentiellement sur les processus opérationnels du système de formation.

A. III. Modélisation UML

La vue du système de formation selon MECI nous permet d'identifier avec précision le périmètre des processus opérationnels de ces systèmes. Cependant, dans l'objectif de créer des méthodes et outils d'aide à la conception des processus opérationnels, il apparaît nécessaire de décrire avec un niveau de granularité supérieur les processus opérationnels du système de formation. Aussi, nous nous tournons vers UML (Unified Modeling Language) [OMG, 2007], langage de modélisation permettant une représentation détaillée des objets et des relations entre ces objets intervenants au sein de notre système de formation. Nous présentons une vue générale de la représentation UML des processus opérationnels dans l'Annexe 3 et détaillons ici chaque objet/entité et les relations qui les réunissent. Ce modèle UML nous permet ainsi de voir figurer l'ensemble des tâches, activités, acteurs et compétences au niveau de leur spécification. On peut noter également que la « **thématique** » présentée dans ce modèle est en fait une micro-tâche de formation qui tend à se rapprocher voire égaler la notion de compétence telle que définie par LE BOTERF [LE BOTERF G., 2006a].

Afin de détailler ce modèle UML, nous présentons ses constituants principaux (Tâches, Activités, Acteurs, Compétences) en nous appuyant sur le méta-modèle MECI :

- **Tâches** : Dans notre modèle UML, nous définissons trois niveaux de tâches qui correspondent toutes à une granulométrie différente comme le présente la Figure 17.

L'**action de formation** (ou **macro-tâche**) représente le service qui est proposé par le système de formation à ses clients. La souscription à ce service de formation par un apprenant est réalisée à travers la **phase de formation**. Il est bien sûr évident que le prix de vente du service dépend de l'action de formation mais également du client qui y souscrit. Par exemple, un client « industriel » ne paiera pas le même prix qu'un client « étudiant » alors que la prestation sera équivalente. En effet, en France notamment, l'État participe pour bonne part à la formation des étudiants mais en revanche, il ne participe que peu ou pas à celle des professionnels.

La **tâche de formation** (ou **tâche**) est une agrégation à vocation administrative nous permettant de séquencer de façon plus appropriée la formation. Cette agrégation peut être homogène ou hétérogène quant au domaine des thématiques qu'elle réunit. Cette tâche de formation correspond à un type de tâche de formation comme par exemple, un module, un stage, etc. À titre d'exemple, une **unité d'enseignement** (UE) de mathématiques regroupera des thématiques gravitant autour du même domaine (les mathématiques). En revanche, un **stage** peut bien

sûr inclure un accroissement de compétences dans le domaine de la mécanique, mais également dans celui de l'anglais ou encore de la communication. Nous pouvons ainsi par le biais de l'héritage, envisager d'autres « types » **de tâches de formation** et ainsi assurer la flexibilité nécessaire à une adaptation à des systèmes de formation existants comme dans le cas de projets de réingénierie.

La **thématique** (ou **micro-tâche**) représente l'accroissement d'une compétence unitaire. Elle fait nécessairement référence à un et un seul domaine et c'est à partir de ce niveau seulement que nous sommes en mesure d'établir les notions de précédences [BISTORIN O. et *al.*, 2006] ;

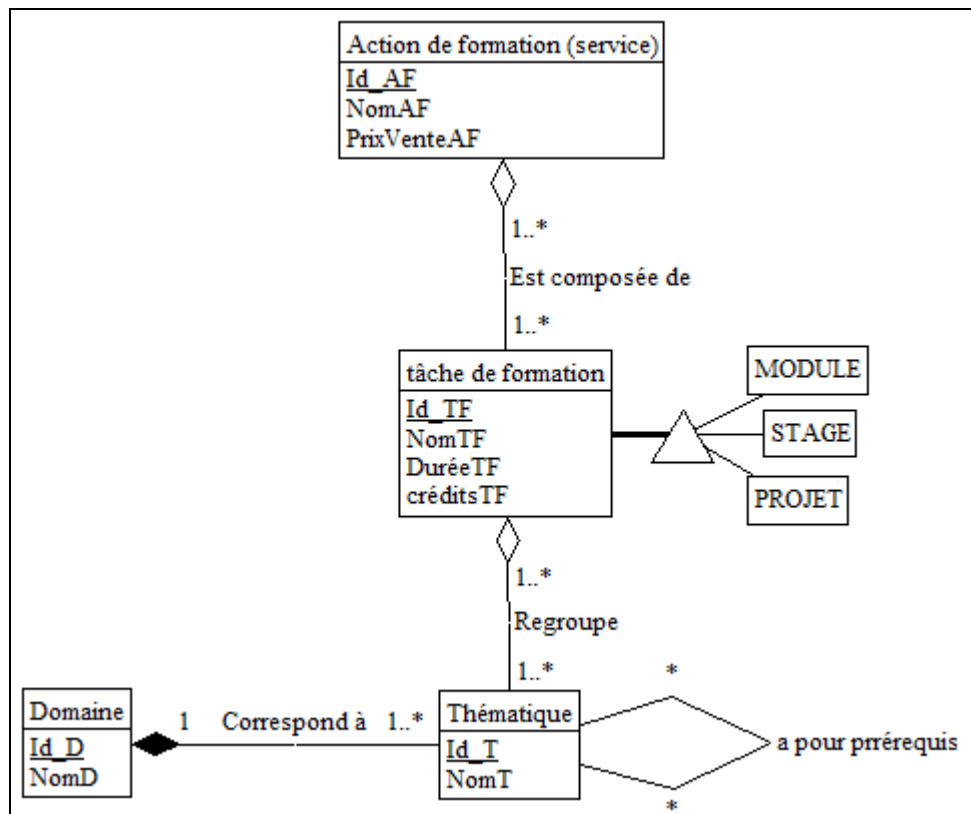


Figure 17. Granularité des Tâches dans un système de formation

- Acteurs** : Conformément au méta-modèle MECI où le terme Acteur regroupe l'ensemble des ressources Humaines mais également Techniques, financières, *etc.* le modèle UML proposé nous permet de spécifier l'ensemble des propriétés des **Ressources Humaines** et des **Ressources Techniques**. Toutefois, il ne faut pas négliger la ressource critique de fonctionnement de notre système qui n'est autre que l'**apprenant**. En effet, bien qu'il s'agisse d'une ressource Humaine, le fait que celui-ci soit également notre client recevant la valeur ajoutée nous a conduit à considérer une entité exclusive permettant de spécifier des caractéristiques propres au client et notamment sa participation à une **phase de formation** pour l'accomplissement d'un service de formation. Nous aurons l'occasion de détailler ce point lors de la description de notre approche orientée service. Ces ressources peuvent naturellement bénéficier d'indisponibilités pour certains éléments temporels comme par exemple les périodes de maintenance ou de congés comme l'indique la Figure 18 ;

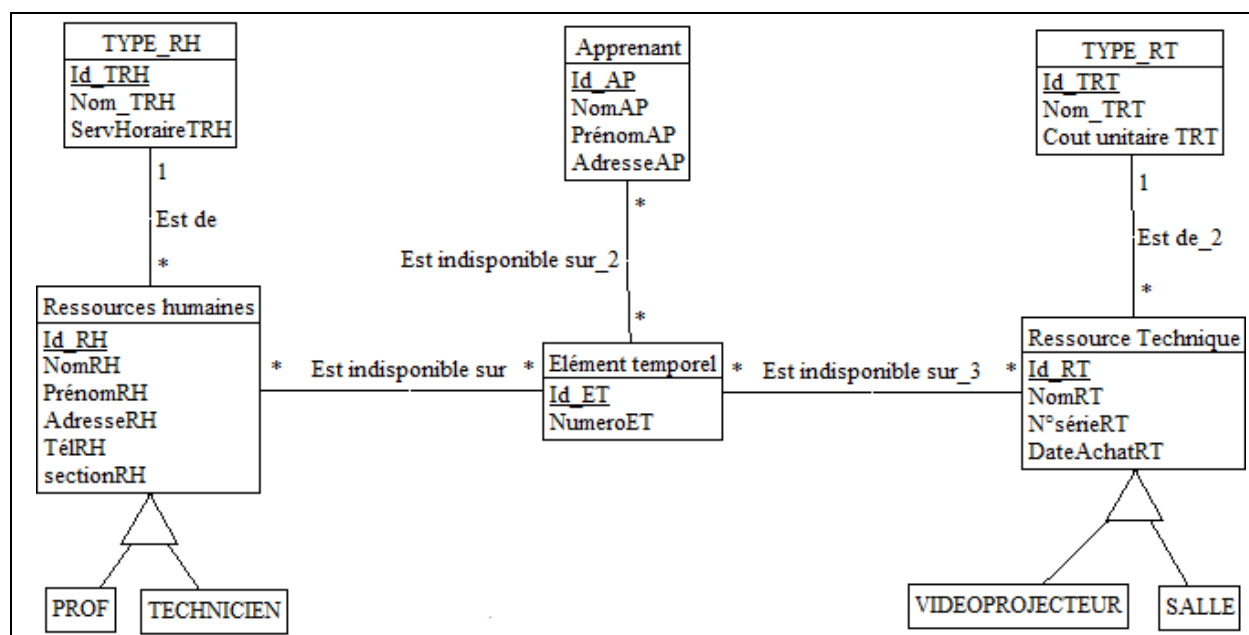


Figure 18. Modélisation UML des acteurs-Ressources du système de formation

- Compétences et aptitudes** : Notre modèle intègre la notion de capacité d'une part pour l'ensemble des ressources Humaines et Techniques, mais également pour l'ensemble des apprenants qui, étant nos clients, s'avèrent coproducteurs du service qu'ils reçoivent. Il est donc nécessaire de maîtriser le référentiel de compétence des apprenants à transformer. Ainsi, notre modèle nous permet de documenter les thématiques maîtrisées par les apprenants, et ce à n'importe quel instant du cycle de formation. On peut également noter que le degré de maîtrise d'une thématique est également consigné pour toutes les autres ressources humaines comme par exemple les enseignants ou les techniciens. Ce degré de maîtrise de la compétence pourra ainsi être utilisé plus tard lorsqu'il faudra ou non définir une priorité d'une ressource humaine par rapport à une autre. Cette notion est développée dans la partie traitant de la mise en œuvre des formations. Nous présentons donc à la Figure 19 l'intégration des compétences et aptitudes dans notre modèle ;

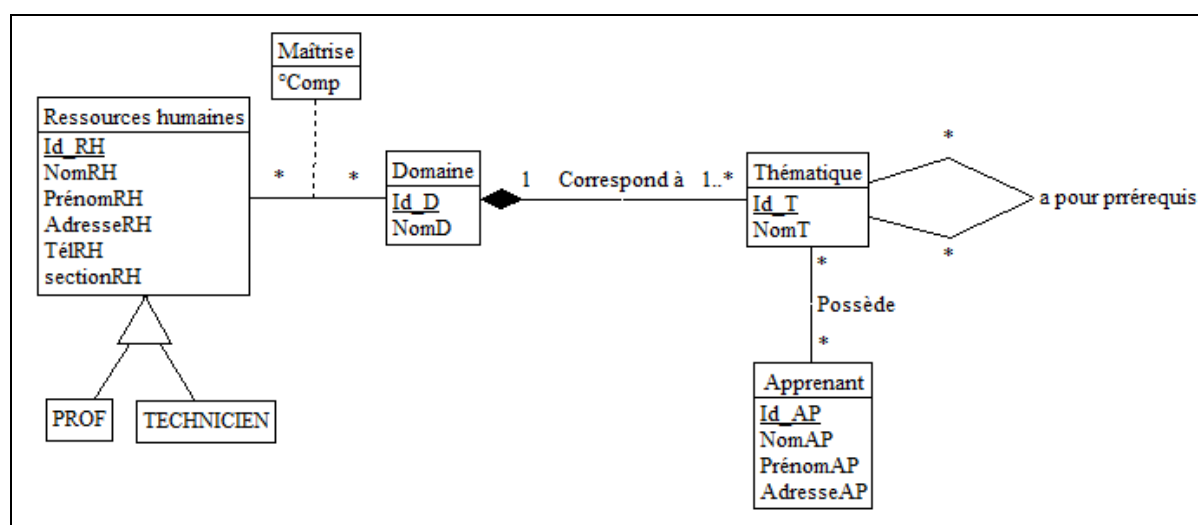


Figure 19. Intégration des compétences et aptitudes des ressources du système de formation

- **Activités :** Afin de répondre aux préoccupations dans un premier temps de planification puis d'ordonnancement par la suite, nous définissons deux niveaux de description des activités que nous présentons à travers la Figure 20.

Les **Éléments de Formation Spécifiés** nous permettent de spécifier le déroulement de la **thématique** concernée. On introduit ici la notion de gamme de formation. Il est évident que pour une même thématique, plusieurs éléments de formation peuvent être nécessaires. Ceux-ci font nécessairement référence au mode d'acquisition de la compétence (Cours, TD, TP, etc.). Les éléments de formation spécifiés nous permettent également de préciser les types de ressources Humaines et Techniques nécessaires, leur quantité ainsi que leur capacité requise. Enfin, il est possible de spécifier des précédences entre éléments de formation et ce, pour une même thématique.

Les **Éléments de Formation Planifiés** nous permettent de décrire pleinement la phase d'ordonnancement et donc de réalisation. En effet, ils constituent un rendez-vous entre nos clients (**apprenants**) et une ou plusieurs ressources humaines et techniques et ce, pour la réalisation d'un **élément de formation spécifié** durant un ou plusieurs **éléments temporels**.

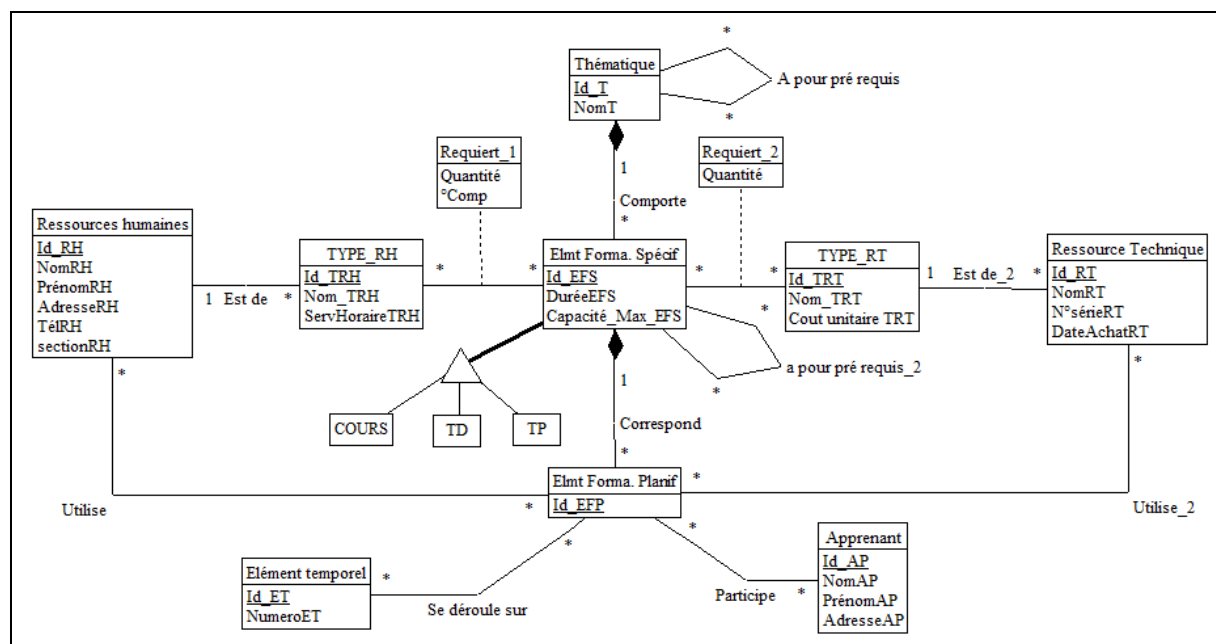


Figure 20. Modélisation UML des activités des processus opérationnels du système de formation

Le modèle UML dont nous disposons à présent n'est bien sûr pas exhaustif mais il nous permet d'aborder toutes les préoccupations liées à la conception et la mise en œuvre des formations au sein d'un système quelconque. L'évolutivité permise par UML nous garantit l'adaptabilité de notre modèle à n'importe quel système de formation, qu'il s'agisse d'un projet d'ingénierie ou de réingénierie d'un système de formation.

Il reste à préciser que l'ensemble des méthodes et outils qui sont présentés par la suite ont pour base ce modèle UML, vision complète des Tâches, Acteurs, Activités et Compétences au sein des processus opérationnels du système de formation.

B. Démarche de conception des formations – Génération de gammes de formation

C'est enrichis de la modélisation claire des processus opérationnels du système de formation que nous cherchons à mettre en place une méthode, associée à des outils, permettant la conception et la mise en œuvre des formations au sein du système. Le premier focus est donc porté sur l'étape de conception des formations. Comme le montre le chapitre 1, cette étape a déjà beaucoup mobilisé la communauté scientifique. Toutefois, nous avons également observé que les différentes étapes permettant une conception de formations efficaces, sont souvent cloisonnées les unes par rapport aux autres et cela ne permet pas une cohérence globale qui s'avérerait profitable au système de formation. Aussi, nous présentons notre démarche globale pour la conception des formations où nous nous attachons successivement à la prise en compte des référentiels de compétences attendus, aux référentiels de compétences des apprenants, aux précédences pouvant être établies entre compétences et enfin, nous en déduisons la conception de la « gamme de formation » permettant la définition des formations suivant un axe cohérent et répondant à une vraie demande.

B. I. Création du catalogue de formation

Nous avons évoqué notre volonté forte d'assimiler les systèmes de formation à des systèmes de production de biens ou de services. Cela implique de considérer qu'un tel système a pour finalité la satisfaction de ses clients. Nous rappelons que nous identifions pour nos systèmes trois clients distincts qui sont bénéficiaires directs ou indirects des services ou produits issus du système de formation. Ces trois clients sont [BISTORIN O. et *al.*, 2006]:

- **L'apprenant** : c'est le premier bénéficiaire du service de formation. Aussi, il est important de le satisfaire en premier lieu mais également savoir le séduire afin qu'il souscrive à nos services de formation ;
- **Les organismes recruteurs et la société** : ils sont en effet les futurs consommateurs des apprenants issus du système de formation. Ils participent donc à la spécification des exigences concernant le profil de compétences attendu ;
- **L'organisme financeur** : dans la mesure où il finance, nous nous devons de le satisfaire.

La satisfaction des clients ne peut être atteinte que par un échange régulier avec ceux-ci afin de pouvoir formaliser leurs attentes et mettre en place les actions permettant de les satisfaire. Dans ce contexte, nous souhaitons permettre au système de formation de clarifier son offre vis-à-vis de ses clients par la mise en place d'un catalogue de services de formation, au même titre que l'on trouve des catalogues de produits pour les systèmes manufacturiers ou des catalogues de services pour les entreprises de services (banques, organes de gestion, administrations privées, *etc.*).

a) Approche orientée services

La mise en place de notre catalogue de services s'inscrit pleinement dans une approche orientée services de formation. Forts de nos observations des systèmes de formation, nous identifions plusieurs types de services de formation pouvant être offerts. Ces services se diversifient notamment par leur type et par la granularité qui peut être différente d'un service à l'autre. Par exemple, un apprenant souhaitant réaliser une mobilité dans le cadre d'un programme

ERASMUS en Europe souhaitera s'inscrire pour un certain nombre de modules de formation assez limité tandis qu'un étudiant entrant en école d'ingénieurs souhaite (selon toute vraisemblance) y réaliser l'ensemble de sa scolarité pour en obtenir le diplôme. Si l'on considère que les deux étudiants que nous venons d'évoquer se retrouvent au sein du même système de formation, alors, ils suivront peut-être le même module alors que celui-ci ne s'inscrira pas dans le même service global (semestre ERASMUS ou cursus ingénieur). Ainsi, la Figure 21 présente de façon non exhaustive les différents services identifiés au sein d'un système de formation (ici l'ENIM – École Nationale d'Ingénieurs de Metz) et met en évidence la possibilité de produire des catalogues de services spécifiques à chaque type identifié.

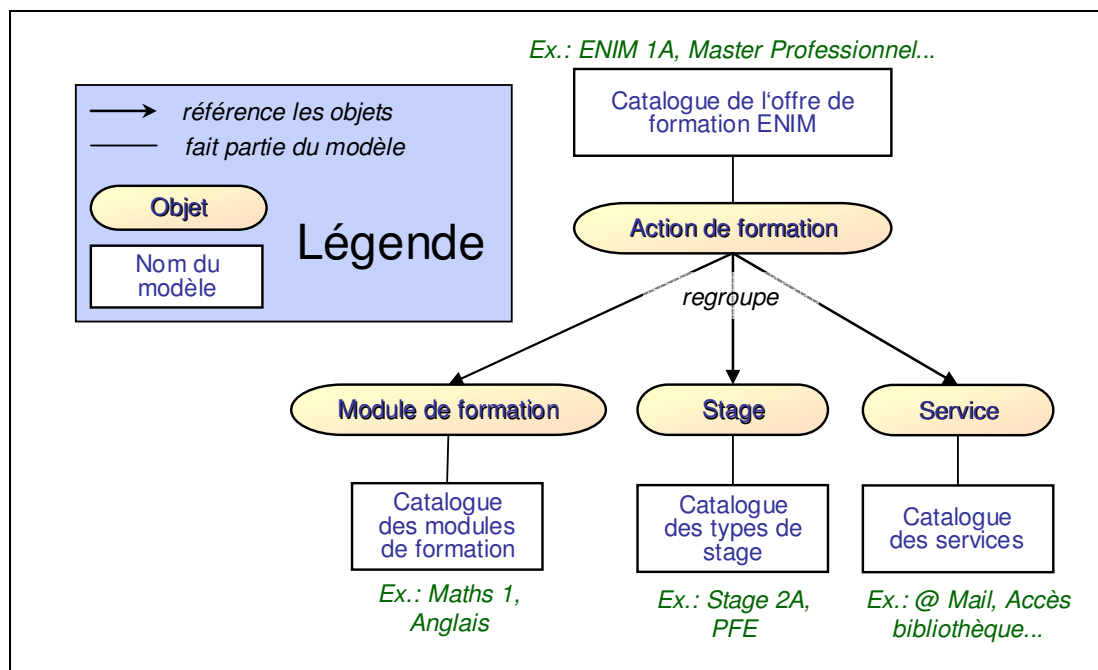


Figure 21. Identification des différents catalogues de services associés au système de formation ENIM

La lecture de cette figure nous permet donc de mieux comprendre cet aspect de granularité évoqué auparavant. Si l'on revient sur notre exemple opposant les intérêts divergents entre un étudiant ERASMUS et un étudiant souhaitant obtenir le titre d'ingénieur, on constate que l'étudiant ERASMUS souscrira des services issus des catalogues individuels situés au bas de la figure (Catalogue des modules de formation, catalogue des types de stage, catalogue des services). Il pourra donc « à la carte » composer son action de formation. En revanche, et pour proposer des services plus complets, le système de formation peut se doter d'actions de formation étant une agrégation élaborée de services unitaires (modules, stages, services). C'est donc une action de formation à fort niveau d'agrégation à laquelle souscrirait l'élève souhaitant réaliser l'ensemble du cursus d'ingénieur en vue de l'obtention du diplôme.

Nous pouvons également ajouter qu'une étude complète des services de formation de l'ENIM a été réalisée à l'aide du progiciel de modélisation par processus ADONIS de la société BOC GmbH à laquelle nous sommes associés pour notre projet de recherche autour de l'ingénierie de la formation [BISTORIN O. *et al.*, 2005].

La nécessité d'intégrer cette vue orientée services se retrouve dans de nombreux autres exemples. Elle est très présente au niveau de l'université car

toutes les formations sont segmentées par UE (Unités d'Enseignement) et chaque étudiant s'inscrit de façon autonome à une batterie d'UE pour un semestre. Cela facilite l'intégration d'étudiants issus de tous horizons.

Il reste à préciser que la typologie des services de formation repose sur les pratiques pédagogiques observées (Unités d'Enseignement, stage, projet, *etc.*) mais reste complètement évolutif permettant ainsi une grande flexibilité et adaptabilité à des systèmes de formation quelconques notamment pour la réingénierie desdits systèmes.

b) Référentiels de compétences terminales

Il est possible de structurer l'offre de formation par le biais des catalogues de services offrant ainsi aux clients une meilleure lisibilité sur les apports du système. Toutefois, il est fondamental que ces services reçoivent l'agrément des clients potentiels. Dans le cadre des systèmes de formation professionnalisant, c'est-à-dire dont la finalité est la formation d'apprenants qui rejoindront à l'issue de leur formation le secteur de l'emploi, l'exigence des clients externes (organismes recruteurs) est constituée par la définition de référentiels de compétences métiers. La mission du système de formation réside alors dans la production d'apprenants ayant acquis un référentiel de compétences spécifique à leur future situation professionnelle. Aussi, nous nous interrogeons, ici, sur la façon de formaliser ces référentiels de compétences attendues. La recherche scientifique a développé une très forte activité dans ce secteur permettant ainsi de disposer actuellement de méthodes et d'outils permettant l'établissement de référentiels de compétences nécessaires à l'accomplissement d'une mission. On retrouve ces mêmes préoccupations autour d'un autre axe de la recherche nommé Knowledge Management KM (Gestion des connaissances). Cet axe s'interroge sur les compétences en entreprises, la façon de les identifier, les capitaliser, les transférer, *etc.* Aussi, de nombreux secteurs d'activités ont développé des référentiels de compétences que nous pouvons directement exploiter pour les définir comme cible de nos systèmes de formation. D'autres référentiels ont également été développés par d'autres organes. On peut citer par exemple les référentiels évoqués au chapitre 1 (cf. **1.C. I.a**), page 42) comme ROME de l'ANPE ou les référentiels VAE créés par les systèmes de formation eux-mêmes.

Nous positionnons nos travaux sur les systèmes de formation à vocation professionnalisante car comme nous venons de l'exposer, les référentiels de compétences cibles sont nombreux. En ce qui concerne les systèmes de formation existant en amont, on pourrait imaginer que, comme dans le cadre des chaînes logistiques, le système de formation amont est fournisseur du système de formation en aval mais le constat que nous avons fait est que cela relève de l'utopie et que chaque système fonctionne en vase clos affectant ainsi gravement la cohérence des parcours de formation sur l'ensemble de la vie d'un individu. Aussi, l'analyse détaillée du fonctionnement entre systèmes de formation ainsi que la proposition de méthodes et d'outils permettant d'assurer cette transmission relèveraient probablement d'une autre thèse à part entière.

Ayant identifiés les référentiels de compétences à atteindre, il nous faut donc nous interroger sur comment notre système de formation permettra à un élève quelconque d'atteindre ce référentiel : Quel sera son parcours ?

B. II. Définition du parcours apprenant

Grâce à la partie précédente, nous connaissons maintenant les référentiels de compétences à atteindre pour les formations proposées par le(s) système(s) de formation. Toutefois, afin de pouvoir décrire de façon complète la spécification du parcours de formation, il nous manque deux éléments. Ces deux éléments peuvent être résumés par les deux questions suivantes :

- **Quel est le référentiel de compétences de départ, celui des apprenants entrant dans notre système de formation ?**
- **Comment fait-on pour passer d'un référentiel de compétences à un autre par le biais de la formation ?**

Ce sont à ces deux questions que tentent de répondre les travaux présentés dans cette partie. Il nous est possible de mener une réflexion complète sur le parcours apprenant. Enfin, grâce aux éléments de réponse proposés, il apparaît une problématique quant au choix du « meilleur » parcours de formation. Nous proposons donc un outil de simulation des parcours apprenant permettant de valoriser l'un ou l'autre en fonction de critères déterminés. Nous présentons dans une dernière partie cet outil.

a) Formalisation des référentiels de compétences des apprenants entrants

La formalisation des référentiels de compétences des personnes souhaitant intégrer le système de formation est très complexe à réaliser. En effet, cette complexité provient essentiellement du fait qu'on constate une grande hétérogénéité sur le profil des apprenants souscrivant au même service de formation. Cette disparité est d'autant plus forte dans les systèmes de formation de l'enseignement supérieur au sein desquels il existe de nombreuses passerelles entre les différentes formations et les différents organismes de formation. Cette hétérogénéité rend donc plus difficile la conception des parcours de formation car il faut s'éloigner d'une approche de la formation par la massification comme on a pu l'observer dans certains systèmes de formation, notamment dans l'université française. À l'inverse, la personnalisation complète des formations, idéale pour les apprenants, se heurte au fonctionnement même du système de formation. Nous aurons l'occasion de repréciser ces points ultérieurement. Toutefois, certains systèmes de production ont réussi à personnaliser les produits ou services en fonction des attentes de ses clients par le biais de gammes variables. C'est le cas par exemple de l'entreprise DELL, fournissant des ordinateurs dont la configuration est en très grande partie paramétrable. Ce fonctionnement n'entache pourtant pas la productivité puisque DELL reste une entreprise florissante.

Certains systèmes de formation, pour résoudre une part du problème, assujettissent leur accès à un examen. L'inconvénient de l'examen est qu'il ne garantit qu'un référentiel minimum de compétences. Ainsi, on peut dire que tous les apprenants retenus à l'examen possèdent au moins le profil de compétences attendus. Toutefois, l'examen ne permet pas de connaître le profil complet de chaque étudiant car il est important de rappeler qu'un examen reste bien souvent une moyenne de compétences et ne permet pas d'identifier des carences ou des points d'excellence du futur élève.

Afin donc de pouvoir formaliser le profil de compétences d'un apprenant avant qu'il n'entre dans le système de formation, la méthode la plus efficace consisterait à utiliser le référentiel de compétences sortant du système de formation en amont dont proviendrait cet apprenant. En effet, ces référentiels « de sortie » sont plus

simples à réaliser et existent donc en grand nombre car ils font très souvent référence aux profils métiers fournis par les organismes recruteurs.

La Figure 22 permet d'expliciter ce concept en mettant en évidence la nécessaire homogénéité de référentiel entre deux systèmes de formation et comment l'organisme recruteur participe à la spécification de ces référentiels intrants et extrants.

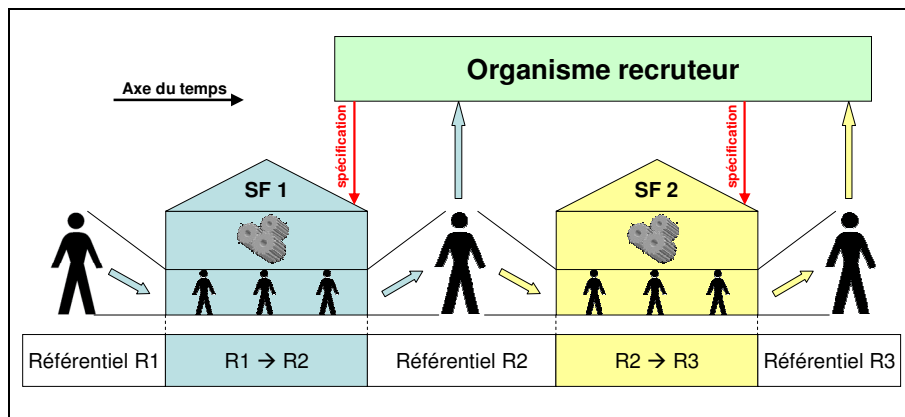


Figure 22. Spécification des référentiels de compétences intrants et extrants

Bien sûr, la réflexion que nous présentons à la Figure 22 s'applique pour un service de formation uniquement ce qui signifie qu'il s'adresse à un public uniquement. La réalité étant que les formations peuvent être ouvertes à des personnes possédant un profil différent, il appartient d'intégrer cette hétérogénéité lors de la conception des services de formation. Cela amène à se poser la question de l'efficacité des formations personnalisées et jusqu'où peut aller la personnalisation sans pour autant qu'elle affecte la viabilité économique du système. Il nous apparaît évident que la solution résidera dans un compromis entre la massification et la personnalisation. D'autres données économiques font pour le moment défaut pour répondre à cette question car nous n'avons pas encore abordé le problème des ressources. Celui-ci sera traité lors de la mise en œuvre des formations (cf. 2.C, page 76).

b) Identification des précédences entre compétences

La description des compétences, telles que nous les considérons, passe par la description des pré-requis nécessaires à l'acquisition de cette compétence [LE BOTERF G., 2006a]. Les pré-requis d'une compétence sont constitués par d'autres compétences. Rappelons qu'une compétence est composée de savoirs, savoir-faire et savoir-être [BELLIER S. *et al*, 1999]. Aussi, nous nous interrogeons sur la façon de formaliser les pré-requis associés à une compétence. La compilation de l'ensemble de ces informations nous permettrait ainsi de pouvoir établir un graphe des précédences général pour l'ensemble des services de formation du système.

Dans l'objectif de constituer un graphe de précédences général, une méthode pertinente consiste, par le biais d'une étude de capitalisation de l'expérience des formateurs et d'identification des bonnes pratiques, en la restitution des compétences pré-requises. On retrouve ici une préoccupation bien connue dans la gestion de projets où les activités à réaliser entre elles sont naturellement séquencées. À l'instar de ce que l'on constate dans la gestion de projets et afin d'éviter la complexité du graphe de précédences, il nous appartient d'identifier les

pré-requis directs et uniquement ceux-là comme le montre la Figure 23 à travers un exemple. Notons que cet exemple est réalisé pour 5 compétences (thématique du modèle UML) appartenant à un domaine homogène (exemple : les mathématiques).

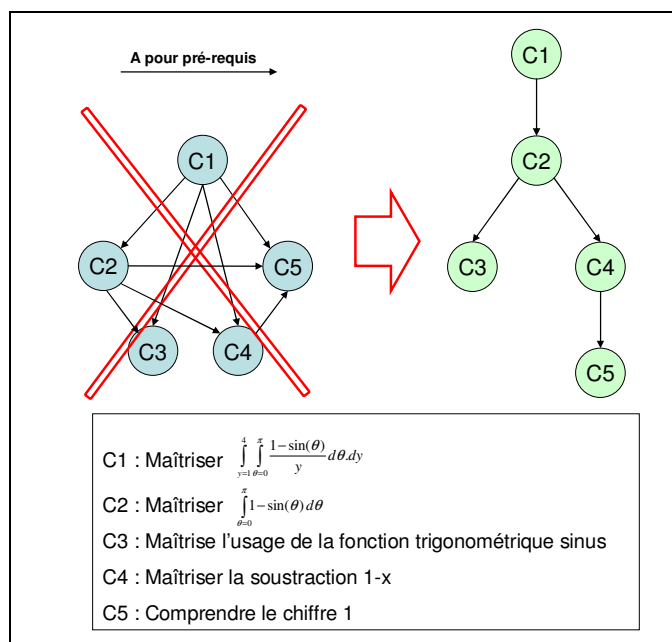


Figure 23. Description des pré-requis directs entre compétences

L'exemple traité ci-dessus met en relief la réelle nécessité d'identifier les pré-requis directs pour la constitution du graphe de précédences général. Nous pouvons également indiquer que cette méthode doit être déclinée à partir des compétences composant le référentiel de compétences métier puis répétée jusqu'à l'atteinte du référentiel de compétences des apprenants entrants. Toutefois, comme nous l'évoquons précédemment, les référentiels de compétences intrants sont divers et variés au même titre que les différents services de formation proposés. Aussi, il incombe au système de formation d'être en mesure de créer un parcours de formation adapté aux attentes de ses clients quant au référentiel de compétences à atteindre et ce, par rapport au référentiel de compétences des apprenants entrants.

c) Conception de la gamme de formation

L'analogie, mise en évidence dans ce mémoire, entre les systèmes de formation et les systèmes de production de biens et de services nous offre l'opportunité d'envisager la conception d'un parcours de formation comme on conçoit une gamme de fabrication ou d'assemblage ou de fourniture du service. En effet, l'apprenant étant l'objet recevant la valeur ajoutée dans le système de formation, on peut considérer que lui sont ajoutées – assemblées – des compétences. En comparaison avec un système de production de biens, on peut considérer les compétences comme étant des composants qui vont être assemblés à l'apprenant traversant le système, lui conférant ainsi une valeur ajoutée. Aussi, nous souhaitons que le parcours de formation puisse être désigné et formalisé comme une gamme de formation. Cette gamme pourra admettre des opérations de transformation en parallèle ou pas en fonction des contraintes imposées au système et des moyens dont celui-ci se dotera pour assurer le transfert de la

compétence chez l'apprenant. Cette notion est plus largement abordée lors du traitement de la simulation des gammes de formation.

La diversité des référentiels métiers à atteindre et celle des référentiels de compétences des apprenants entrants nous conduit à envisager la création d'une multitude de gammes de formation adaptées aux besoins de nos clients (apprenants et organismes recruteurs). Il est donc impératif que le système de formation dispose d'un outil permettant la génération rapide de ces gammes de formation afin de pouvoir conférer à ce même système toute l'agilité nécessaire lui permettant de satisfaire ses clients.

Disposant d'un graphe de précédences général, nous cherchons donc à repérer les compétences qu'un apprenant devra acquérir en fonction de son référentiel d'entrée et du référentiel métier qu'il cherche à atteindre. Pour ce faire, nous procéderons en trois étapes :

- Indiquer toutes les compétences nécessaires ainsi que toutes leurs compétences pré-requises pour l'atteinte d'un référentiel métier ;
- Indiquer toutes les compétences et toutes leurs compétences pré-requises possédées par l'apprenant lors de la souscription du service de formation, soit à l'entrée dans le système, soit consécutivement à un redoublement de l'apprenant par exemple ou certaines compétences auront été validées tandis que d'autres non ;
- Réaliser la différence de ces deux regroupements afin de connaître avec précision l'ensemble des compétences qu'il restera à acquérir par l'apprenant pour ce service de formation.

La Figure 24 illustre plus clairement ces trois étapes en indiquant en rouge les compétences associées au référentiel de formation X, en vert les compétences associées à l'apprenant Y et enfin en bleu les compétences restant à acquérir par l'apprenant Y pour posséder le référentiel de formation X. Cela correspond donc aux compétences incluses dans le service de formation Z qui sera proposé au catalogue de service de notre système de formation.

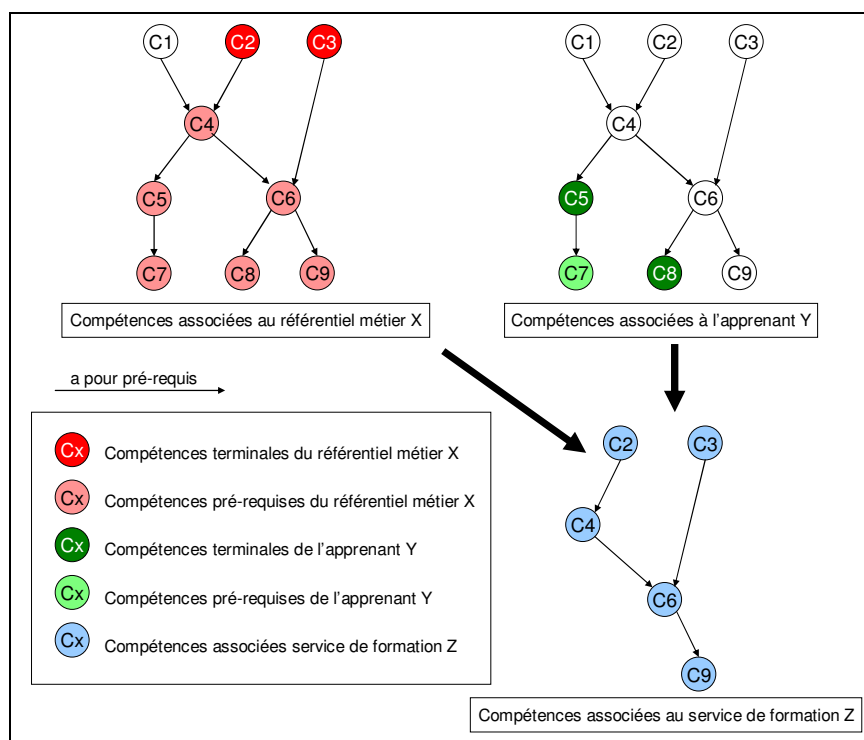


Figure 24. Constitution de la gamme de formation à partir des référentiels métiers et apprenant

Afin de pouvoir réaliser les trois étapes décrites ci-dessus, nous avons fait le choix de développer un outil informatique pour la génération de la gamme de formation. Ainsi, dans un premier temps, cet outil permet la description du graphe de précédences général permettant ainsi de formaliser toutes les précédences existantes entre toutes les compétences pour lesquelles notre système de formation prévoit un processus de formation. Cet outil prend la forme d'une base de données dont le modèle de données relationnel s'appuie sur le modèle UML que nous avons présenté auparavant (cf. **2.A. III**, page 56). Forts de la description du graphe de précédences général, l'outil informatique permet de repérer toutes les compétences pré-requises associées aux compétences terminales d'un référentiel métier ou d'un référentiel apprenant. Enfin, la dernière étape permet le calcul des compétences à transférer dans le cadre d'un service de formation adapté à l'apprenant pour le référentiel métier sollicité.

Toutes ces opérations sont réalisées à partir d'un algorithme de calcul développé à partir du système de gestion de bases de données (ici ACCESS) que nous présentons à la Figure 25. Le langage utilisé pour cet algorithme est le SQL (Structured Query Language), langage de haut niveau utilisé pour le traitement des requêtes au sein des bases de données relationnelles. Afin de bien comprendre cet algorithme, il faut savoir que :

- La table T1 fait référence à la table où sont stockées l'ensemble des précédences entre compétences (là où est décrit le graphe de précédences) ;
- La table T2 correspond aux compétences terminales du référentiel (métier ou apprenant) ;
- La table T3, qui va être complétée par cet algorithme, représente l'ensemble des compétences terminales et pré-requises d'un référentiel (métier ou apprenant).

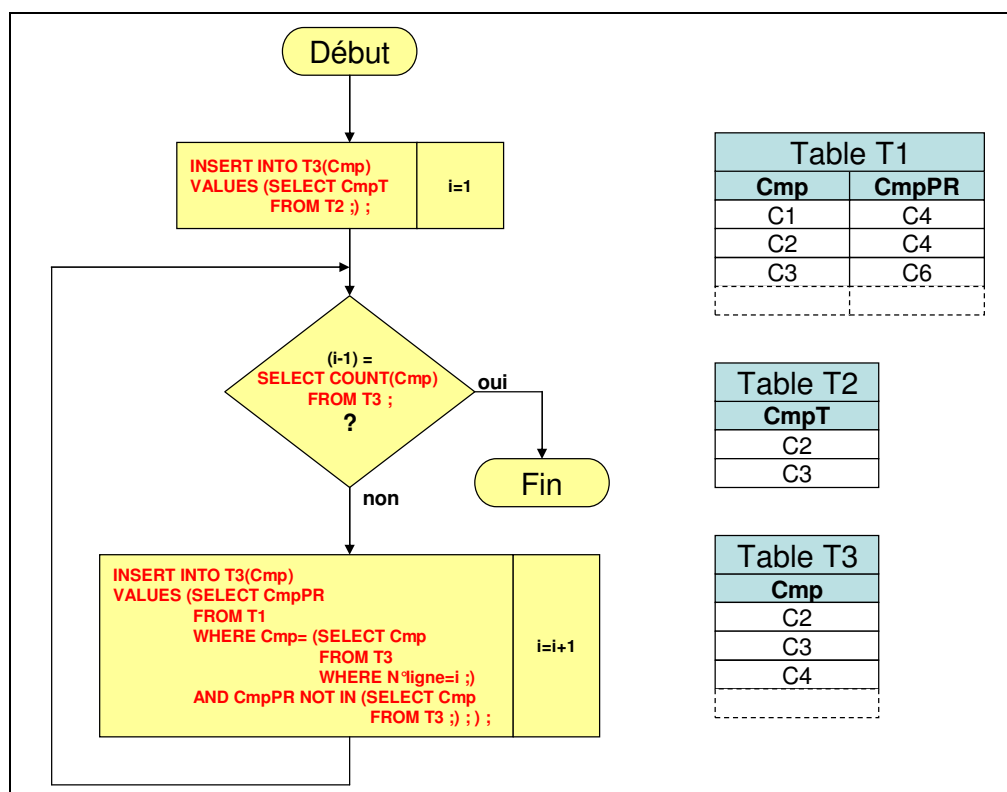


Figure 25. Algorithme de définition des compétences pré-requises par rapport aux compétences terminales d'un référentiel

Par une application de cet algorithme au référentiel métier puis au référentiel apprenant, on dispose donc des deux portefeuilles de compétences associés à ces deux référentiels. Il s'agit donc à présent de réaliser la différence entre ces deux portefeuilles pour connaître quelles sont les compétences restant à acquérir par cet apprenant pour posséder à l'issue, ce référentiel métier. Pour ce faire, nous utilisons notre outil informatique qui, par le biais d'une nouvelle requête SQL, formalise les compétences qui composeront la gamme de formation appropriée. Considérons les trois éléments suivants :

- T4 : table des compétences associées au référentiel métier X ;
- T5 : table des compétences associées à l'apprenant Y à son entrée dans le système de formation ;
- T6 : table des compétences à acquérir par l'apprenant Y pour atteindre le référentiel métier X (gamme de formation).

Notre requête s'écrit alors :

```
INSERT INTO T6
VALUES ( SELECT Cmp
        FROM T4
        WHERE Cmp NOT IN ( SELECT Cmp
                          FROM T5 ; ) ) ;
```

Grâce à cet outil informatique, le système de formation est dorénavant en mesure de spécifier une gamme de formation adaptée aux attentes de deux de ses clients : les apprenants et les organismes recruteurs. Toutefois, certains paramètres ne sont pas encore intégrés car notre outil garantit uniquement une cohérence quant au respect de l'ordre d'acquisition des précédences. Ce portefeuille de compétences à acquérir admet pourtant une grande flexibilité par rapport notamment à l'ordre d'exécution des processus de formation permettant l'acquisition des compétences. À ce niveau, les outils analytiques ne peuvent répondre à notre besoin et nous avons dû nous tourner vers la simulation. En effet, la complexité du problème provient en grande partie du fait que de très nombreuses gammes différentes peuvent exister. Ainsi, l'analyse devient difficile voire impossible car la combinatoire explose rapidement.

d) Problématique de la simulation des parcours élèves

Les travaux que nous avons présentés jusqu'à présent nous permettent de connaître les compétences qu'il faudra acquérir par un apprenant afin qu'il atteigne un référentiel de compétences métiers désiré. Ces compétences respectent une notion de précédences établies suivant les pré-requis pédagogiques. Toutefois, l'ordre des processus permettant l'acquisition de ces compétences n'est pas figé car le système pourrait, par exemple, admettre du parallélisme quant à l'acquisition des compétences. Par exemple, on peut imaginer des séquences de formation qui permettent dans une plage horaire définie, l'acquisition en simultané de plusieurs compétences. Dans le même ordre d'idée, sans parler de simultanéité, on peut imaginer que le fait de faire se succéder rapidement deux processus d'acquisition de compétences a de meilleures vertus pédagogiques que si ces deux mêmes processus se retrouvent éloignés dans le temps. Cela s'accorde avec la notion abordée dans le chapitre 1 mettant en avant le cycle de vie compétences chez un apprenant. Ce cycle de vie induit la notion qu'une compétence peut progressivement décliner chez l'apprenant et donc, lors de pré-requis directs, il est plus intéressant de rapprocher temporellement ces deux

processus d'acquisition de compétences pour éviter la déperdition au niveau des compétences.

D'autres facteurs économiques peuvent intervenir tel que par exemple, un accès temporellement limité à un logiciel utilisé pour une formation regroupant plusieurs compétences (exemple : à l'ENIM, l'accès au logiciel SAP est financé pour un mois et le coût est important. Aussi, toutes les compétences à développer faisant appel à ce logiciel doivent être acquises pendant cette période).

Ainsi, on constate rapidement que réaliser une gamme « qui fonctionne » est simple mais réaliser un ensemble de gammes de formation efficaces l'est beaucoup moins et s'attache au respect de contraintes parfois difficiles à formaliser et surtout très hétérogènes d'un système de formation à l'autre. C'est pourquoi nous avons choisi d'aborder cette problématique sous l'axe de la simulation en s'éloignant de l'approche analytique formelle qui perdrait rapidement ses moyens face à la complexité et à la diversité des situations rencontrées.

e) Notre approche pour la simulation des parcours élèves

Afin de doter le système de formation d'un outil de simulation des différentes gammes de formation acceptables, nous nous tournons vers les réseaux de Petri à ressource partagée [DAVID R. et ALLA H., 1992]. Ce choix est guidé par deux éléments.

La première raison est qu'il existe de nombreuses solutions satisfaisant aux contraintes de précédences imposées par le système. Toutefois, les critères permettant de discriminer ces solutions les unes par rapport aux autres nous sont inconnus car imposés de façon spécifique par chaque système de formation. Aussi, nous devons proposer une batterie de solutions acceptables afin que chaque système de formation puisse valoriser, en fonction de ses besoins ou de ses contraintes, chacune de ces solutions et se positionner légitimement sur une d'elles.

Ainsi, les réseaux de Petri à ressource partagée, permettent une modélisation des conflits structurels et effectifs. Et son étude permet un traitement probabiliste pour les opérations validant au même moment les critères de précédences. Ne favorisant pas une transition (début d'apprentissage d'une compétence) plus qu'une autre, nous obtiendrons une solution totalement aléatoire respectant uniquement les contraintes de précedence entre compétences imposées par le graphe de précédences général que nous avons décrit précédemment. Il est aussi possible de générer l'ensemble des solutions admissibles par l'élaboration par cheminement avant ou arrière du graphe d'atteignabilité. Ce cheminement peut donner l'ensemble des séquences de franchissements permettant d'aller du marquage initial au marquage final désiré. Ces séquences donnent ainsi les étapes nécessaires pour un apprenant pour atteindre les compétences désirées en tenant compte de son acquis initial. Cependant cette recherche s'appuie sur la génération du graphe d'atteignabilité. Aussi seuls des problèmes de petites tailles pourront être analysés suivant cette démarche.

C'est pour cela que la seconde raison qui nous oriente vers les réseaux de Petri est qu'ils permettent de simuler le déroulement séquentiel ou simultané d'actions sous contrainte de ressources [HAAS P. et SCHEDLER G., 1989]. Or, pour simuler le parcours dédié à un apprenant, il est évident que ce dernier constitue la ressource critique de ce parcours puisque sa disponibilité est nécessaire pour le déroulement de toutes les activités.

Cherchant à conserver notre approche similaire à celle utilisée pour le traitement des systèmes de production de biens et de services, nous nous inspirons des outils de simulation par Réseau de Petri utilisés pour le traitement de problèmes analogues. Nous choisissons donc de représenter chaque processus d'acquisition de compétences à travers un Réseau de Petri-T temporisé, celui-ci permettant d'intégrer la durée nécessaire à l'acquisition d'une compétence.

Aussi, on peut considérer que le processus d'acquisition d'une compétence peut être représenté par quatre places qui sont :

- **C_{xa}** : Le marquage de cette place représente le fait que la compétence **x** reste à acquérir ;
- **C_{xc}** : Le marquage de cette place représente le fait que la compétence **x** est en cours d'acquisition ;
- **C_{xr}** : Le marquage de cette place indique que la compétence **x** a été acquise ;
- **Ed** : Le marquage de cette place représente le fait que l'apprenant ou l'élève est disponible ;
- **C_{yr}** : Cette place indique que la compétence **y** est un pré-requis pour l'obtention de la compétence **x**.

La Figure 26 présente la mise en place de ces places au sein du Réseau de Petri évoqué.

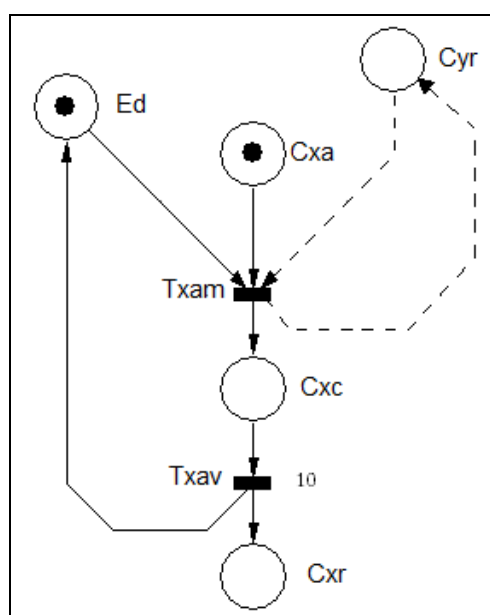


Figure 26. Réseau de Petri unitaire associé au processus d'acquisition d'une compétence

De la même manière, on peut repérer sur la Figure 26 que deux transitions existent en amont et en aval de la place C_{xc} :

- **T_{xam}** : Le tir (ou la validation) de cette transition implique le passage d'un jeton de C_{xa} vers C_{xc} et déclenche ainsi le processus d'acquisition de la compétence ;
- **T_{xav}** : Le tir de cette transition implique le passage d'un jeton de C_{xc} vers C_{xr} et représente ainsi la fin du processus d'acquisition de compétence. C'est cette transition qui est temporisée. Cette temporisation représente le temps nécessaire au processus d'acquisition pendant lequel la place C_{xc} devra rester active. Ici le temps nécessaire à l'acquisition de la compétence **x** demande 10 unités de temps.

Au réseau de Petri présenté sur la Figure 26, nous pouvons associer les matrices d'incidence reflétant l'impact sur les places du tir des différentes transitions. Nous présentons les matrices d'incidence amont (Pré) et aval (Post) au Tableau 15.

Pré	C _{xa}	C _{xc}	C _{xr}	Ed	C _{pr}
T _{xam}	1	0	0	1	1
T _{xav}	0	1	0	0	0
Post	C _{xa}	C _{xc}	C _{xr}	Ed	C _{pr}
T _{xam}	0	1	0	0	1
T _{xav}	0	0	1	1	0

Tableau 15. Matrice d'incidence du RdP associé au processus d'acquisition d'une compétence

Ces matrices d'incidence méritent toutefois quelques explications pour être bien comprises. Prenons le cas de la matrice d'incidence amont pré, si l'on analyse la première ligne, on peut lire que le tir de T_{xam} consomme trois jetons, provenant de C_{pr}, de C_{xa} et de Ed. Cela signifie que T_{xam} ne peut être validée que si la compétence C_x est à réaliser (C_{xa} portant un jeton), si l'élève est disponible (Ed portant un jeton) et si la compétence pré-requise C_p est possédée. On peut également lire que le tir de T_{xam} provoque la création d'un jeton au sein de la place C_{xr}, rendant ainsi actif le processus d'acquisition de la compétence chez l'apprenant.

Enfin, il nous reste à aborder la problématique de ce qui est appelé marquage initial du réseau de Petri. Le marquage initial correspond au positionnement des jetons dans les places à l'état initial du système. Aussi, avant le déroulement du parcours apprenant, les seules places devant porter un jeton doivent être la place Ed (pour indiquer que l'apprenant est disponible), l'ensemble des places C_{xa} pour toutes les compétences que l'étudiant aura à acquérir, et une partie de places de type C_{pr}.

Les compétences à acquérir seront déterminées par le biais de l'outil de génération de gamme que nous avons présenté dans la partie précédente. Les places de type C_{pr} participant au marquage initial sont les compétences déjà maîtrisées par l'apprenant à son entrée dans le système.

Afin de bien illustrer nos propos et expliquer en détail la constitution de ce réseau de Petri associé au parcours de formation d'un apprenant, nous nous proposons de traiter un court exemple reprenant celui illustré à travers la Figure 24 de la page 66. Aussi, nous nous proposons d'en rappeler les grandes lignes.

Le système de formation traité en exemple dispose d'un graphe de précédences général formalisant les pré-requis existant entre les neuf compétences disponibles au sein de notre système. L'apprenant Y, disposant de certaines compétences à l'entrée dans le système souhaite réaliser une formation lui permettant d'atteindre un référentiel métier X. Grâce à l'outil de constitution de gamme de formation présenté dans la partie précédente, nous avons défini le service de formation Z visant à l'acquisition des compétences C2, C3, C4, C6 et C9.

Aussi, nous appliquons toutes les règles évoquées précédemment pour réaliser le réseau de Petri correspondant. La Figure 27 donne une représentation graphique de ce réseau en utilisant l'outil informatique VisualObject.

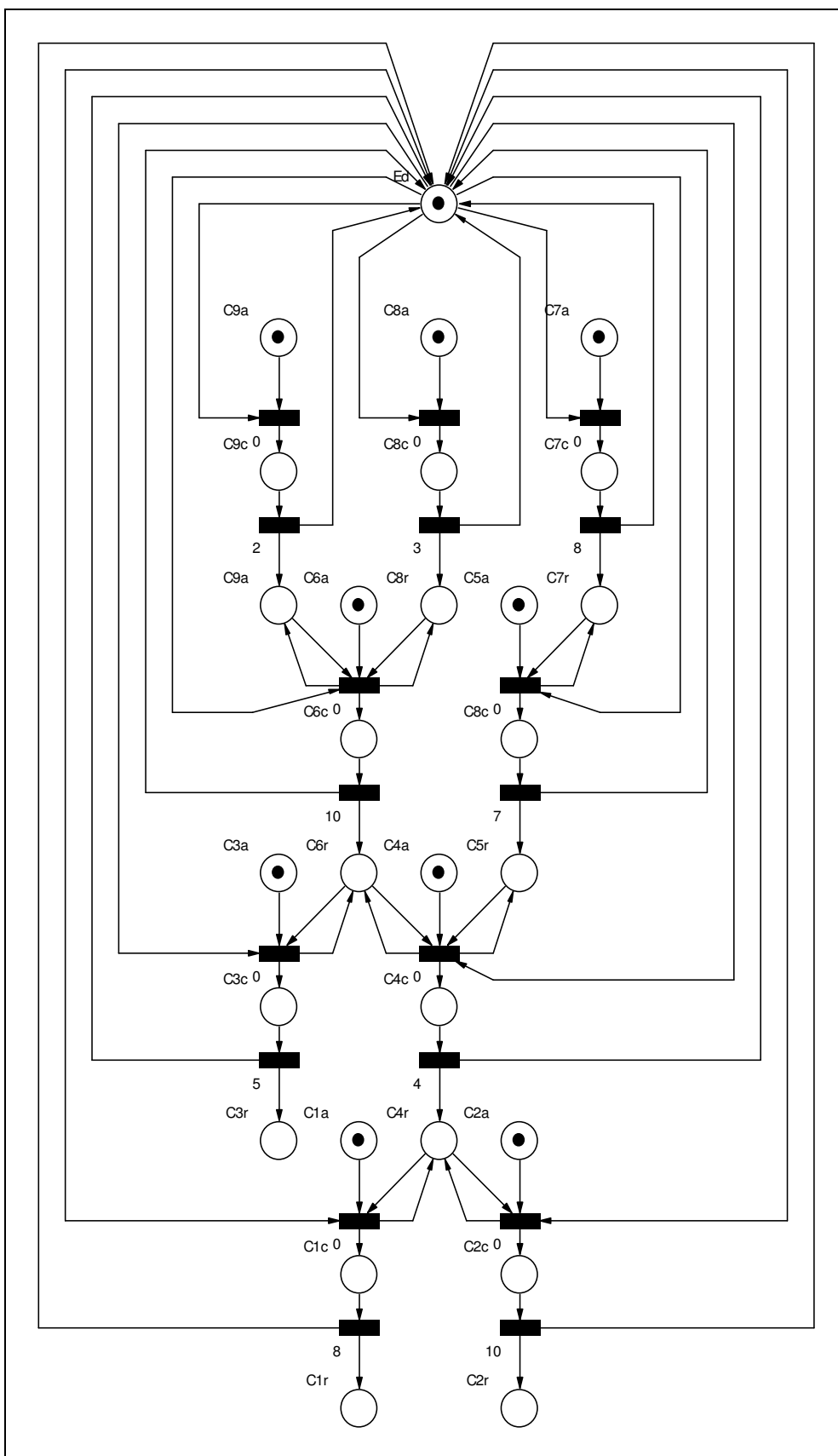


Figure 27. Représentation graphique sous VisualObject du réseau de Pétri associé à notre exemple

Toutefois, il est bien sûr évident que la représentation graphique n'est envisageable que pour le traitement de cas élémentaires n'excédant pas une

vingtaine de compétences. Passée cette limite, la représentation graphique perdrait en lisibilité.

Notre objectif étant de simuler le déroulement des processus d'acquisition de compétences afin d'obtenir un ou plusieurs parcours de formation viables pour un apprenant ayant souscrit un service de formation, nous poursuivons le développement de l'outil évoqué afin qu'il puisse réaliser une simulation des formations. L'outil actuel, présenté dans la partie précédente, s'articule autour d'une base de données sous ACCESS dans laquelle figure la description de l'ensemble des compétences et de tous les pré-requis pouvant exister entre celles-ci. Ainsi, nous choisissons de développer un module complémentaire permettant, à partir de l'ensemble des informations de la base de données, de générer la matrice d'incidence ainsi que le marquage initial du réseau de Petri associé au service de formation en question. Grâce à la formalisation de la matrice d'incidence et du marquage initial, nous sommes en mesure d'effectuer une batterie de simulations du déroulement dudit réseau et de les recompiler dans un fichier pour un traitement analytique ultérieur. Pour ces simulations, nous considérons que l'élève devra suivre l'ensemble des processus d'acquisition de compétences de façon séquentielle et excluons ainsi toute simultanéité. En effet, il nous semble plus pertinent de considérer que chaque processus d'acquisition s'exécute indépendamment des autres et permet ainsi de concevoir tout ce processus en ne tenant compte que de la compétence à acquérir. Cette prise en compte nous permet de calculer le temps total nécessaire à un apprenant pour l'acquisition de toutes les compétences auxquelles il a souscrit. Ce temps peut être un critère d'évaluation dans le choix d'un parcours. Pour faire le parallèle avec un langage adapté aux systèmes de production de biens et de services, on peut dire que l'opération de transformation ne génère pas de coproduit. Il nous reste encore à préciser que l'ensemble des parcours qui seront proposés pourront être valorisés ultérieurement les uns par rapport aux autres en fonction de critères de décision qui seraient propre à chaque système de formation en fonction de sa stratégie et des facteurs clé de succès qui en auront découlé.

Afin de réaliser toutes les fonctionnalités évoquées, nous avons cherché parmi les outils existants traitant des Réseaux de Petri, s'il en existait qui permettaient d'importer une matrice d'incidence et un marquage initial puis de réaliser la simulation n fois et enfin exporter ces résultats pour un traitement ultérieur. Malheureusement, aucun des outils que nous avons pu auditer ne remplissait tout ou partie des fonctions citées ci-avant. C'est pourquoi nous avons fait le choix de développer notre propre outil qui dialoguerait de façon efficace avec la base de données que nous possédions déjà. Pour la création de cet outil, nous nous sommes orientés vers le logiciel de programmation Labview® de National Instruments. Ce choix pourrait paraître exotique mais il est motivé par la forte nécessité de communication avec l'extérieur et notamment notre base de données. En effet, Labview® est à la base prévu pour exploiter, par supervision, des matériels physiques, analogiques ou numériques, et ce, en fonction de l'acquisition, numérique ou analogique de signaux de mesure. Aussi, pour remplir ces fonctionnalités particulières, Labview® est doté d'outils puissants de scrutation de fichiers d'échanges et d'écriture dans ces mêmes fichiers. Nous choisissons de faire communiquer Labview® et notre base de données par le biais de fichiers d'échanges et en l'occurrence ici de fichiers texte (*.txt). Le nombre de scrutations de ces fichiers étant important, Labview® nous apparaît tout à fait approprié pour le traitement de ce problème.

Ainsi, la base de données exporte deux fichiers d'échanges :

- Le premier comprend l'ensemble des compétences à acquérir et l'ensemble de leurs propriétés propres (durée, coût, description détaillée, *etc.*) ;
- Le second fichier permet la description de l'ensemble du graphe de précédences entre compétences tel qu'il a été établi dans l'outil de bases de données.

Grâce à ces deux fichiers, notre module complémentaire sous Labview® génère la matrice d'incidence, le marquage initial et simule l'exécution du réseau de Petri associé autant de fois que désiré par l'utilisateur. Le résultat de ces simulations est alors exporté dans un fichier de traitement numérique (Excel en l'occurrence) afin que le système de formation puisse valoriser l'une ou l'autre des solutions proposées en fonction de critères qui lui seraient propre. Nous avons donc créé un simulateur par Réseau de Petri dédié aux systèmes de formation. À ce jour, cet outil fonctionne de façon isolée par rapport à la base de données et malheureusement, le traitement reste séquentiel et piloté depuis deux interfaces distinctes selon l'ordre suivant :

- Saisie sous la base de données des compétences et des précédences entre celles-ci ;
- Génération, grâce à l'algorithme de la base de données, des compétences à acquérir spécifiquement pour un apprenant en fonction du référentiel métier souhaité ;
- Export des fichiers d'échanges depuis la base de données (écriture au format texte *.txt) ;
- Récupération des fichiers d'échanges depuis le simulateur développé sous Labview® ;
- Traitement des simulations grâce au simulateur ;
- Export du résultat des simulations vers un outil d'analyse (Excel en l'occurrence).

Bien sûr, parmi les objectifs que nous évoquons au dernier chapitre de ce mémoire, nous souhaitons développer une interface unique permettant le traitement de l'ensemble de ces tâches à partir du même logiciel.

f) Exemple pour la simulation des parcours apprenant

Dans l'exemple que nous présentons à présent, nous traitons le cas du programme scolaire du DUT (Diplôme Universitaire Technologique) génie mécanique et productique⁵⁷ tel que défini par le ministère de l'Éducation Nationale Français pour les deux années d'études que compte ce diplôme. Nous avons choisi un programme de formation déjà existant pour deux raisons. La première est que nous pourrions valider la pertinence des solutions proposées sur un cas réel et l'adaptabilité de notre modèle et de notre outil à ce cas réel. La deuxième raison est qu'il nous faut connaître la rapidité de calcul de notre outil pour la simulation en fonction de la taille du problème à traiter. Aussi, nous pourrions, à travers cet exemple, mesurer le temps de génération d'une ou plusieurs simulations d'un parcours de formation s'étendant sur deux ans donc assez riche. Rappelons en effet que les méthodes et outils que nous proposons

⁵⁷ Le programme du DUT génie mécanique est disponible à l'adresse suivante : <http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/enseignementsup/770.pdf> . Il est également possible de retrouver l'ensemble des programmes pédagogiques de tous les DUT proposés en France à l'adresse <http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/enseignementsup/dut.htm>

dans ces travaux de thèse ont pour but l'ingénierie ou la réingénierie des systèmes de formation. Nous devons donc nous assurer de la compatibilité avec l'existant même si celui-ci peut être amélioré, optimisé et c'est tout l'objet de nos travaux.

Ainsi, autour de cet exemple, nous décrivons toutes les étapes de notre méthode en commençant par la spécification des compétences et précédences associées dans notre outil de base de données comme le présente la Figure 28.

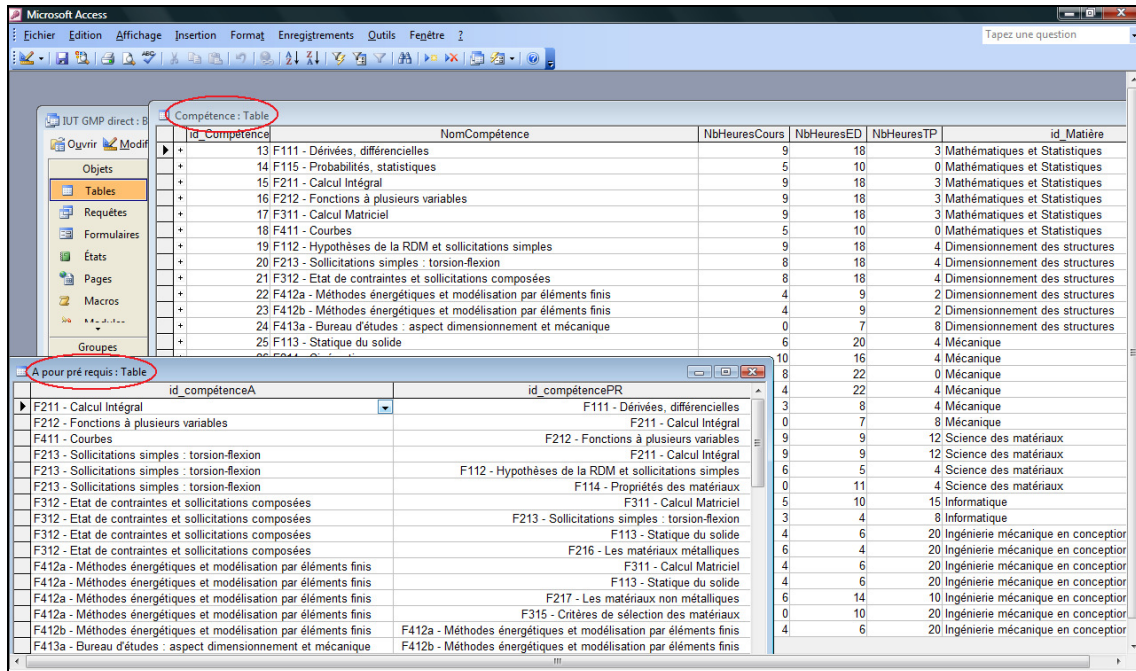


Figure 28. Renseignement des compétences et précédences dans la base de données

Suite à la saisie des informations nécessaires dans la base de données, nous poursuivons notre méthode en mettant en œuvre l'outil de simulation développé sous Labview®. Nous présentons ainsi grâce à la Figure 29 l'interface de notre simulateur permettant dans l'exemple le traitement d'une batterie de quatre simulations différentes.

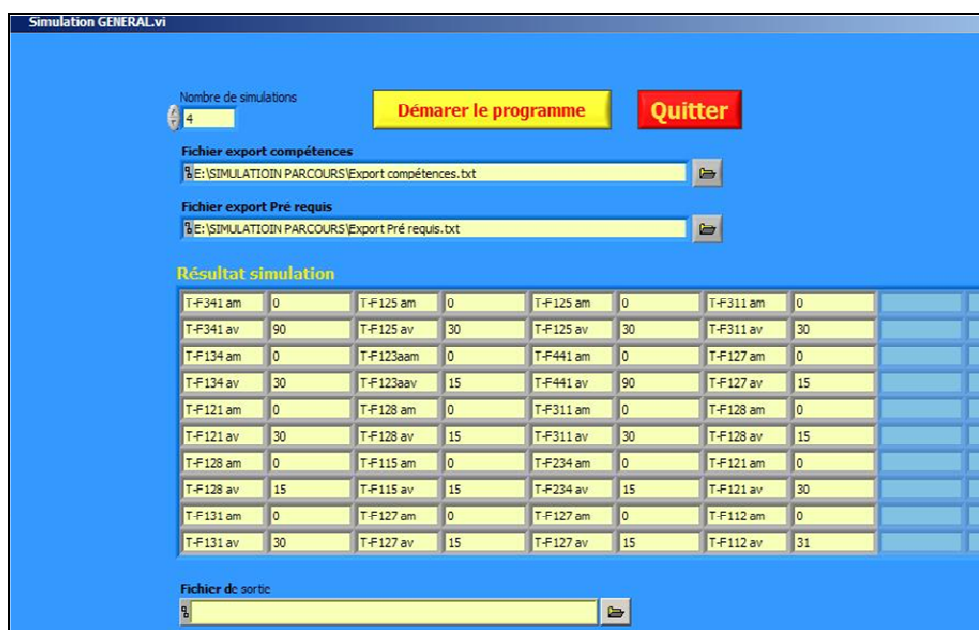


Figure 29. Simulateur de parcours apprenant utilisant les Réseaux de Petri

Pour ce résultat de simulation, nous avons souhaité obtenir la désignation des compétences dans l'ordre ainsi que la durée d'acquisition associée à chacune d'entre elles. L'Annexe 4 présente le résultat de cette batterie de simulation une fois l'export réalisé. Ce fichier a été réalisé pour cent simulations. Il est intéressant de s'attarder au temps de calcul ayant été nécessaire pour la réalisation de ces cent simulations. Sur une machine classique (configuration PIII, 2,5Ghtz, 1024Mo de mémoire vive, SE : Windows® XP, Labview® 8.0), le traitement complet de ces simulations et leur export vers le fichier d'analyse numérique (Excel®) a duré 83 secondes sachant que le problème représente un volume de 78 compétences à ordonner par simulation. Ce temps de calcul est jugé tout à fait satisfaisant.

Ainsi, à travers l'exemple présenté ci-dessus, nous validons notre méthode associée aux outils présentés qui nous permettent de procéder à la conception de formations cohérentes sur l'axe pédagogique et satisfaisant de façon concertée deux de nos principaux clients : l'apprenant et l'organisme recruteur.

Cette méthode associée aux outils nous permet donc de créer des parcours apprenants adaptés aux attentes de chacun et surtout cohérents entre eux. De plus, les outils de simulation nous permettent de valoriser différentes solutions générées et notamment par rapport aux délais.

Toutefois, afin de satisfaire pleinement l'ensemble de nos clients, il nous faut prendre en compte la faisabilité des formations conçues ainsi que leur mise en œuvre réelle. Cela implique de se préoccuper d'un problème écarté jusqu'à présent : les ressources nécessaires à leur réalisation.

C. Démarche de mise en œuvre des formations – planification et ordonnancement

Les méthodes et outils que nous présentons dans la partie précédente permettent au système de formation de concevoir avec une grande réactivité des parcours de formation cohérents et répondant à des attentes précises émises par les clients du système. À présent, il est important que le système de formation soit en mesure de mettre en œuvre ces formations une fois conçues en leur affectant notamment des ressources humaines, techniques et financières sur une plage temporelle précise. En d'autres termes, nous cherchons à doter le système de méthodes et outils permettant la planification et l'ordonnancement des formations. Concernant les systèmes de formation, le résultat principal issu de la planification et l'ordonnancement est l'emploi du temps. L'emploi du temps concerne les apprenants mais également l'ensemble des ressources humaines et techniques qui seront immobilisées ou libérées en fonction du temps. Cet emploi du temps doit en outre assurer la cohérence des formations proposées et ce, en fonction d'objectifs déterminés par les facteurs clés de succès du système de formation, déclinés de sa stratégie. Les objectifs peuvent être nombreux et peuvent notamment traiter des coûts, délais ou de la qualité globale des systèmes de formation. Ainsi, nous montrons que la réalisation desdits emplois du temps s'avère très complexe et à ce niveau, certaines divergences apparaissent avec les systèmes de production de biens et de services.

C. I. Planification des formations

Pour la mise en œuvre des formations, la première étape essentielle est la planification des formations. La planification permet pour le système de formation de déterminer sur une période donnée, l'organisation générale des formations qu'il

dispensera et de s'assurer qu'il est globalement capacitaire en terme de ressources sur la période. Le cas échéant, il est possible pour le système de s'adapter par exemple à travers l'acquisition de ressources complémentaires ou la replanification sur l'horizon considéré. Pour mener à bien la planification, nous avons entrepris une spécification plus détaillée des formations en associant à des compétences des éléments de formation (Cours, TD, TP, *etc.*) auxquels nous avons associé en quantité des types de ressources humaines et techniques. Afin de pouvoir bien décrire ces éléments de formation, nous nous sommes dotés d'un outil adapté qui non seulement recompilera ces données mais qui entre autre, garantira la cohérence des formations planifiées suivant l'axe pédagogique (cohérence des pré-requis) mais également sur l'axe des ressources associées en vérifiant la disponibilité en quantité desdites ressources.

a) Spécification des éléments de formation

Pour pouvoir réaliser une planification efficace des formations, nous avons besoin d'un niveau de granularité élevé décrivant au plus près le processus opérationnel. Aussi, nous décomposons le processus d'acquisition d'une compétence en différents éléments de formation. Ces éléments de formation sont d'un type particulier (Cours, TD, TP, *etc.*) et font appel quantitativement aux ressources humaines et techniques de notre système. De la même manière que pour les compétences, ces éléments de formation peuvent nécessiter des précédences entre eux afin d'assurer cohérence et rythme au processus global d'acquisition d'une compétence. L'agrégation structurée de ces éléments de formation constitue donc un processus d'acquisition de compétences encore dénommé thématique dans le modèle UML présenté dans la première partie de ce chapitre. Ces thématiques, peuvent également être regroupées autour d'une tâche de formation, constituant les composants unitaires des services offerts aux apprenants. La Figure 30, extraite du modèle UML déjà présenté, illustre cette spécification.

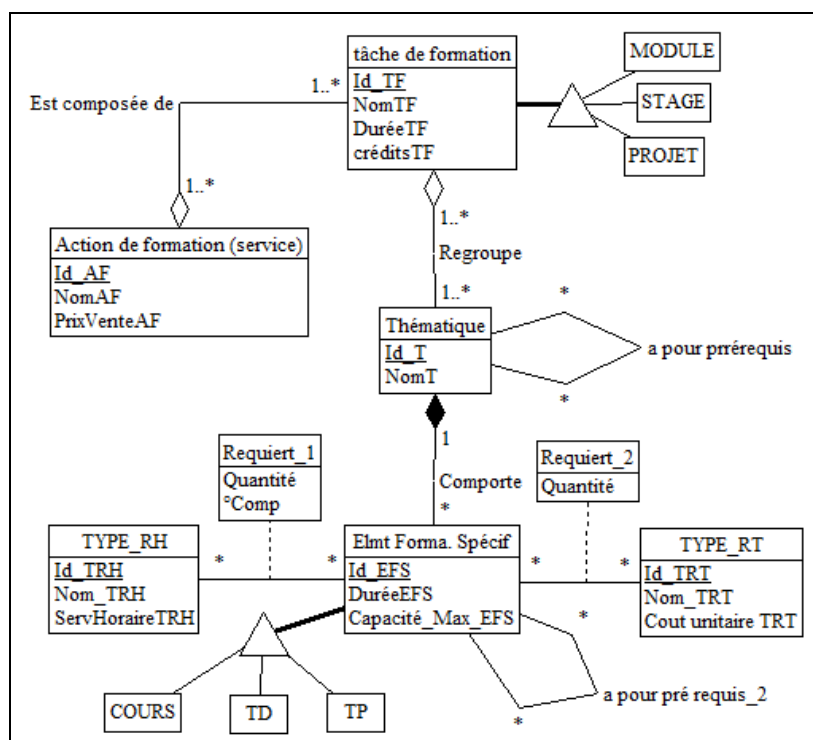


Figure 30. Modélisation UML pour les éléments de formation spécifiés

Une lecture détaillée de ce modèle permet de voir apparaître certains attributs importants au niveau de la planification. Au niveau de la tâche de formation, on voit la durée spécifiée de cette tâche. On trouve également cette propriété au sein de l'entité « élément de formation spécifié ». Par agrégation successive, on verra que ce sera l'occasion de disposer d'un point de contrôle assurant que les durées renseignées sont cohérentes. On trouve également au sein de l'élément de formation spécifié la propriété « capacité_Max_EFS » qui est autre que le nombre d'apprenants maximum autorisé pour que l'élément de formation puisse se dérouler dans de bonnes conditions. Bien sûr, ce type de paramètres pourra différer d'un système de formation à l'autre et c'est en cela que les méthodes et outils que nous proposons sont très flexibles. Enfin, on constate que c'est lors de cette spécification que l'on va indiquer la quantité de ressources humaines et techniques qui seront nécessaires au bon déroulement de l'élément de formation. On peut également noter que, en ce qui concerne les ressources humaines, on pourra assujettir ce besoin à un niveau de compétences choisi par exemple en fonction de la difficulté à enseigner tel ou tel élément de formation ou par exemple en fonction du type d'élément de formation. Par exemple, au sein de l'université, on pourra imposer que les cours magistraux ne puissent être dispensés que par des enseignants possédant un niveau de compétences élevé pour le domaine concerné alors que ce critère sera moins fondamental pour l'encadrement de travaux pratiques par exemple. Ainsi, afin de pouvoir recompiler toutes ces nombreuses informations, nous avons souhaité amplifier l'outil de base de données existant afin qu'il puisse intégrer toutes ces nouvelles préoccupations.

b) Outils pour la planification

À la lecture des nouvelles informations qu'il faut maîtriser pour réaliser une planification efficace, nous proposons un outil de base de données autour de celui existant pour la conception des formations. Celui-ci complète le modèle de données afin qu'il satisfasse au modèle de données UML présenté dans la première partie de ce chapitre. Il faut que cet outil soit d'une part cohérent au niveau du modèle de données mais souhaitons d'autre part qu'il satisfasse à des critères d'ergonomie pour le rendre agréable à l'usage. En ce qui concerne l'implantation du modèle UML, nous devons intégrer le fait qu'ACCESS® soit un outil dit relationnel. C'est-à-dire qu'il satisfait aux douze règles définissant la modélisation et les systèmes de gestion de bases de données relationnels énoncées par CODD en 1970 [CODD E., 1970]. Or, dans le modèle UML proposé, nous n'avons pas fait usage de la notion d'héritage qui bien qu'elle existe dans UML, n'est pas transposable en l'état au modèle relationnel. Grâce à cette propriété, il a été possible d'implanter notre modèle UML à l'intérieur d'un SGBDR⁵⁸ comme l'est ACCESS®. On obtient ainsi 32 relations ou tables permettant de décrire de façon complète les processus opérationnels du système de formation. À ce modèle est associé un catalogue de variables reprenant chacune des variables explicitées dans notre modèle UML. Ce catalogue est divisé en deux parties :

- Les variables intégrées aux relations issues des entités ;
- Les variables intégrées aux relations issues des associations reliant ces entités.

Ce catalogue de variables est présenté aux Annexe 5 et Annexe 6. Il constitue la base de la formalisation des contraintes que nous associons à notre modèle.

⁵⁸ SGBDR : Système de Gestion de Bases de Données Relationnelles

Nous abordons plus en détail cette formalisation dans la partie C. II de ce mémoire.

À partir du modèle implanté, a été développée une interface cohérente avec les besoins des systèmes de formation et dotée d'une ergonomie adaptée à l'usage qui pourrait en être fait tout en gardant à l'esprit l'impérieuse nécessité de créer des méthodes et outils réactifs. Ainsi, à partir d'un menu général unique, présenté à travers la Figure 31, il est possible d'ajouter, modifier ou supprimer n'importe laquelle des variables appartenant au catalogue que nous avons évoqué précédemment.

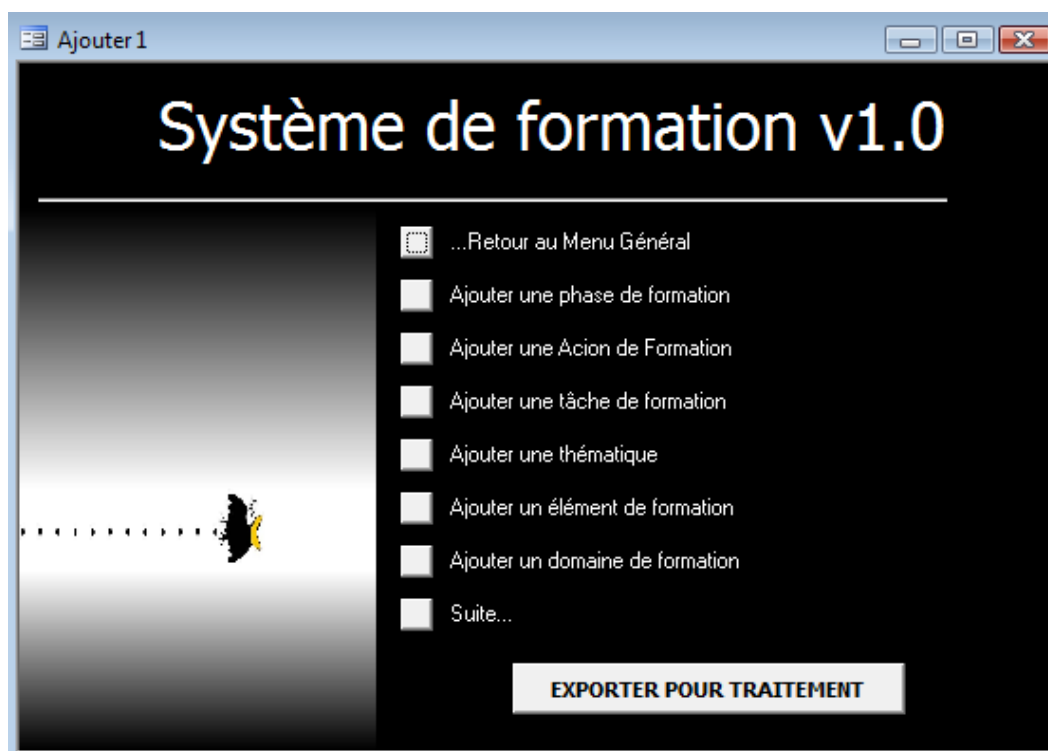


Figure 31. Menu général de l'interface associée à l'outil de bases de données pour les systèmes de formation

Pour la planification, nous concentrons notre réflexion autour de l'élément de formation spécifié comme nous indiqué précédemment. En effet, celui-ci est extrêmement riche en information puisqu'il définit la plus petite granularité au niveau des pré-requis mais permet également d'appeler les ressources humaines et techniques en spécifiant la quantité nécessaire et éventuellement le niveau de compétence ou d'aptitude desdites ressources. La Figure 32 présente l'interface permettant la description de l'ensemble des éléments de formation spécifiés.

On retrouve sur cette figure les paramètres présentés et qui caractérisent notamment l'élément de formation comme par exemple la spécification de la durée ou encore la capacité maximale. On y constate également la possibilité d'associer aux éléments de formation spécifiés les ressources humaines et les ressources techniques (bas de la figure) et de définir les éléments de formation spécifiés pré-requis (en haut à gauche sur la figure). Bien évidemment, toutes ces informations peuvent être aisément modifiables par la suite par exemple suite à l'évolution d'un référentiel de compétences métier ou encore à l'introduction de nouvelles méthodes pédagogiques remettant en cause l'organisation actuelle desdits éléments de formation spécifiés.

Eléments de formation spécifiés

Recherche :

Thématique concernée : +

Type d'élément de formation : +

Durée de l'élément (heure) :

Capacité Maximale :

Élément de formation précédent :

Ajouter l'élément sélectionné comme précédent

Liste des Eléments précédents :

Id	Nom	Durée

Sélection du type de ressource humaine :

Quantité : * compétence :

Ajouter ce type de ressource humaine

Liste des ressources humaines nécessaires :

Type	Quantité	Compétence

Sélection du type de ressource technique :

Quantité :

Ajouter ce type de ressource technique

Liste des ressources techniques nécessaires :

Type	Quantité

Ajouter

Figure 32. Interface permettant la spécification de l'ensemble des éléments de formation spécifiés

Ainsi, cet outil permet la spécification complète des formations à réaliser. À ce stade, les apprenants souscrivent au service de formation et le système doit être capable d'indiquer s'il est en mesure d'assurer la charge, en termes de coûts, délais, ressources, des formations sollicitées par ses clients. Notre outil doit donc s'agrémenter de modules spécifiques permettant d'assurer cette vérification et le cas échéant, alerter le système de formation sur une éventuelle impossibilité de traitement sur l'horizon.

c) Cohérence du système et capacité de charges des ressources

Avant de pouvoir procéder à un ordonnancement des différentes formations, nous avons souhaité garantir la cohérence et la faisabilité sur certains aspects avant même de se lancer dans une démarche plus avancée. Aussi, dès la phase de planification, nous souhaitons doter le système de formation d'un outil pouvant assurer qu'il existe *a priori* une complète corrélation entre les services de formations proposés et les compétences composant ces services de formation. Cet outil devra aussi analyser la capacité en ressources humaines et techniques du système de formation afin de pouvoir alerter ce dernier en cas d'impossibilité de fourniture des services de formation par manque de ressources.

Afin de pouvoir réaliser ces vérifications, nous avons développé un outil faisant appel aux données stockées dans la base de données que nous avons présentée précédemment. À partir de ces données, nous serons donc capables d'alerter le système de formation sur des incohérences repérées. Toutefois, il est important de préciser que cet outil n'aura pas de fonctionnalités correctives mais restera à vocation préventive afin d'éviter une tentative d'ordonnancement de toute façon impossible à réaliser par manque de ressources.

À l'instar de ce que nous avons fait pour le développement du module de simulation des parcours de formation présenté au paragraphe 2.B. II.e), nous nous sommes orientés vers le logiciel Labview® de National Instruments encore une

fois pour ses fonctionnalités avancées pour la scrutation et l'écriture des fichiers d'échange avec notre base de données.

Ainsi, une fois l'export réalisé depuis la base de données pour créer les fichiers d'échanges, le module que nous avons développé récupère dans un premier temps les données nécessaires à partir de ces mêmes fichiers puis réalise successivement trois vérifications :

- **Cohérence entre la durée déclarée d'une tâche de formation (Ed_e d'après le catalogue de variables) et les durées cumulées des éléments de formations spécifiés ($\sum Jd_j$) correspondant aux thématiques faisant partie de la tâche de formation en question.** L'égalité vérifiée devra donc être parfaite et garantira ainsi que les agrégations qui auront été réalisées par le système de formation auront été faites de manière correcte. En d'autres termes, on peut dire que les caractéristiques décrites dans le catalogue de services, pour chaque service de formation, seront représentatives exactement du contenu réel dudit service de formation ;
- **Capacité suffisante en termes de ressources humaines** pour pouvoir assurer l'ensemble des éléments de formation appartenant aux services de formation souscrits par les apprenants. Pour réaliser cette vérification, nous avons du mettre en corrélation le nombre d'apprenants souscrivant aux services de formation avec les capacités d'accueil spécifiées pour chaque élément de formation (Jc_j). En effet, nous devons savoir combien de fois devront être répétés les mêmes éléments de formation afin que tous les apprenants devant y assister aient pu le faire. Nous nous sommes placés ainsi dans le cas le plus défavorable pour les étudiants en considérant que la capacité maximale devrait idéalement être atteinte. Exemple : Si 26 apprenants souhaitent réaliser un service de formation faisant appel à un élément de formation dont la capacité d'accueil maximale est de 10, on peut alors considérer que cet élément de formation devra être réalisé au minimum trois fois pour faire en sorte que tous les apprenants aient pu assister à cet élément de formation. Aussi, le nombre d'heures d'immobilisation des ressources humaines associées sera lui aussi multiplié par trois. Grâce à ces calculs, nous avons pu comparer le volume d'heures de disponibilités des Ressources Humaines total (en fonction du service annuel des enseignants par exemple 384 heures/an pour les PRAG⁵⁹) avec le volume horaire nécessité par le système de formation pour le déroulement des éléments de formations pour tous les apprenants. Bien sûr, ces calculs sont effectués par homogénéité de domaine. C'est-à-dire que l'on compare globalement les disponibilités de ressources humaines compétentes en mécanique générale avec les volumes horaires des éléments de formation spécifiés concernant la mécanique générale ;
- **Capacité suffisante en termes de ressources techniques** pour pouvoir assurer l'ensemble des éléments de formation appartenant aux services de formation souscrits par les apprenants. Pour cette vérification, notre module de calcul utilise la même démarche que pour le calcul des ressources humaines que nous avons présenté à l'item précédent. Ainsi, on met en évidence la disponibilité des ressources techniques face aux quantités appelées par les éléments de formation à réaliser.

⁵⁹ PRAG : Professeur Agrégé

La Figure 33 présente ainsi la partie de l'interface permettant la vérification de la cohérence des horaires entre tâches de formation et éléments de formation.

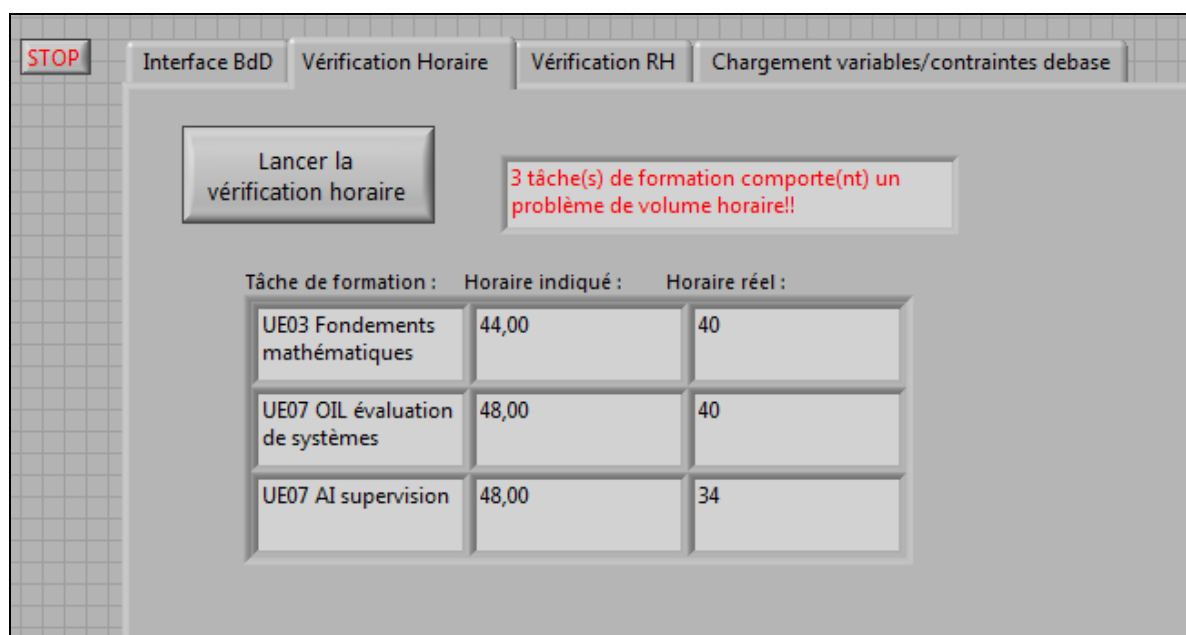


Figure 33. Interface permettant la vérification des volumes horaires spécifiés

Bien sûr, on peut également noter sur la Figure 33, un onglet nommé « interface BdD » à partir duquel est pilotée l'importation des données depuis la base de données. Grâce à ces outils de vérification rapides, le système de formation est dorénavant capable de prendre position très rapidement sur sa capacité à réaliser ou non une formation en fonction du nombre de ressources dont il dispose. Évidemment, il appartiendra au système de formation de décider si, en cas d'impossibilité avérée, il doit évoluer par l'acquisition de ressources complémentaires ou tout simplement refuser la demande de formation. Étant capable d'avoir une vision des flux sur un horizon donné, la planification est ainsi réalisée et la réservation des ressources peut d'ors et déjà être faite. Maintenant, nous pouvons envisager le traitement de l'ordonnancement des éléments de formation qui permettra d'organiser les activités au sein du système. On s'oriente ainsi vers la délivrance d'un emploi du temps pour les apprenants par exemple mais aussi pour les ressources. Pour revenir sur le parallèle avec les systèmes de production de biens et de services, après avoir réalisé les gammes de transformation, nous maîtrisons à présent le plan de charge du système et sommes assurés de sa capacité à assumer ce plan de charge. Maintenant, il nous appartient de produire les ordres de fabrication qui indiqueront quelles ressources sont en charge de la transformation de quels produits et à quel moment.

C. II. Ordonnancement des formations

L'ordonnancement constitue la dernière étape pour la mise en œuvre opérationnelle des formations au sein du système. À travers les méthodes et outils présentés précédemment, le système de formation est capable de réaliser une conception cohérente, efficace et réfléchie des services de formations qu'il offre à ses clients. Le système de formation est également capable de savoir s'il est à-même de répondre à une demande de formation émise par un client. Il reste maintenant à les réaliser effectivement et donc à ordonnancer une multitude de rendez-vous réunissant autour d'un objectif de formation pour une durée et un horaire déterminés, le ou les

apprenants ainsi que la ou les ressources humaines et techniques nécessaires au bon déroulement de ce rendez-vous. La création de ces rendez-vous doit satisfaire à de nombreux objectifs et faire face à de nombreuses contraintes.

Aussi, nous présentons quelles sont les contraintes que nous identifions au sein du système de formation. Parmi ces contraintes, nous montrerons que certaines doivent impérativement être prises en compte alors que d'autres pourraient plus facilement être relaxées. Par la suite, nous expliciterons ces contraintes à l'aide des variables issues du modèle de données et du catalogue de variables associé, que nous avons déjà présenté. Nous énoncerons également la fonction économique que nous avons choisie. Enfin, nous proposerons une approche pour la résolution de ce système et montrerons en quoi cette résolution est très complexe. On verra de quelle manière dans un premier temps, on s'attachera à trouver une solution fonctionnelle et non l'optimum en proposant quelques pistes de résolution.

a) Identification des contraintes

Afin de concevoir les processus opérationnels pour que leur mise en œuvre satisfasse nos clients, il est important de prendre en compte certaines contraintes. La plupart sont relativement évidentes mais d'autres font appel au contexte local du système de formation par exemple ou à la nécessité de cadrer parfaitement avec des référentiels extérieurs nationaux ou internationaux. Pour constituer la liste de contraintes que nous souhaitons intégrer, nous nous sommes en premier lieu inspirés des contraintes prises en comptes par les travaux d'autres laboratoires que nous avons présentées dans le premier chapitre. Par la suite, une réflexion a été menée au sein de notre laboratoire pour intégrer éventuellement d'autres contraintes. Le résultat de notre réflexion a permis de classer les contraintes suivant six axes distincts :

- Contraintes structurelles liées au fonctionnement du système de formation ;
- Contraintes pédagogiques ;
- Contraintes liées aux apprenants ;
- Contraintes liées aux ressources humaines ;
- Contraintes liées aux ressources techniques ;
- Contraintes pour le respect des services attendus ;

Nous présentons donc la liste des contraintes en reprenant les six axes évoqués.

Contraintes structurelles liées au fonctionnement du système de formation

Contrainte n°1 : La phase de formation ne sera lancée que lorsqu'un certain nombre d'apprenants y seront inscrits.

Cette contrainte fait référence à une notion de rentabilité économique. En effet, il ne faut pas perdre de vue que parmi nos clients, on trouve celui qui paie et c'est pour cela que le système de formation doit être économiquement équilibré sans quoi, il est voué à une fin rapide.

Contrainte n°2 : La quantité des apprenants participant à un élément de formation planifié devra être inférieure ou égale à la capacité maximale de l'élément de formation spécifié correspondant.

En effet, il ne sera pas possible de dépasser la capacité maximale autorisée car celle-ci aura été établie pour garantir la qualité pédagogique.

Contrainte n°3 : La somme des crédits des tâches de formation constituant une phase de formation devra être homogène sur une période de temps donnée avec ceux imposés par des référentiels extérieurs.

À titre d'exemple, en Europe, on considère qu'une formation dimensionnée correctement permet d'obtenir 30 crédits ECTS par semestre. Toutefois, lors d'échanges académiques, il sera possible pour l'apprenant de souscrire pour plus de 30 crédits afin par exemple, anticipant un échec éventuel, de garantir l'obtention d'au moins 30 crédits pour valider son semestre.

Contrainte n°4 : Le nombre des crédits de formation d'une tâche de formation est cohérent avec les volumes horaires des éléments de formation spécifiés qui la composent.

Lorsqu'un référentiel extérieur est défini sous forme de crédits, ceux-ci sont associés à un volume horaire de formation. C'est donc pour intégrer cette préoccupation que cette contrainte a été ajoutée.

Contraintes pédagogiques

Contrainte n°5 : Les précédences définies entre les thématiques et entre les éléments de formation spécifiés devront être respectées.

Il est bien sûr évident qu'il nous appartient de respecter les précédences qui ont été définies lors de la conception des formations comme nous l'avons présenté au début de ce chapitre.

Contrainte n°6 : Pour une phase de formation incluant une période de stage, la durée de stage ne pourra pas excéder la moitié de la durée de ladite phase de formation

Cette contrainte est spécifique au système de formation que nous avons traité dans notre exemple. Bien sûr, on fera en sorte que le paramètre de « moitié » soit totalement paramétrable en fonction de l'environnement du système de formation et des référentiels auxquels il sera soumis.

Contrainte n°7 : Tous les éléments de formation de même type (Cours, TD, TP,...) d'une même thématique seront assumés par les mêmes ressources humaines pour un même apprenant.

Cette contrainte nous vient directement du domaine des sciences de l'éducation qui favorise la réduction du nombre d'intervenants pour un même apprenant. Dans notre cas, nous avons imposé cette contrainte uniquement pour une même thématique et pour tous les éléments de formation du même type.

Contrainte n°8 : Le cumul des durées des éléments de formation d'une même thématique planifiés sur la même période de référence pour un même apprenant ne pourra excéder un certain volume horaire.

Là encore, cette contrainte est issue des sciences de l'éducation qui nous indiquent qu'il faut privilégier des enseignements variés sur leur fond et donc sur la thématique qu'ils traitent.

Contrainte n°9 : Le cumul des durées des éléments de formation d'un même type planifiés sur la même période de référence pour un même apprenant ne pourra excéder un certain volume horaire.

Cette contrainte est très semblable à la précédente. Elle a également pour origine les sciences de l'éducation mais s'attache plus particulièrement à la forme des enseignements et non à leur fond. En

effet, on encourage également la diversité des modes d'enseignement (cours, TD, TP, *etc.*).

Contrainte n°10 : Chaque élément de formation planifié sera réalisé en une seule fois.

Cette contrainte pédagogique évite les césures pour un même élément de formation planifié (Cours, ED, TP, ...) si celui-ci s'étend sur plusieurs éléments temporels.

Contrainte n°11 : Chaque élément de formation planifié devra être planifié sur une journée, pas plus.

En complément à la contrainte 10, cette contrainte, du ressort de la pédagogie, évite qu'un élément de formation planifié ne puisse débiter un jour et se poursuivre le lendemain.

Contraintes liées aux apprenants

Contrainte n°12 : Deux éléments de formation distincts ne pourront être planifiés le même jour à la même heure pour un même apprenant.

Cette contrainte est assez logique puisqu'elle rappelle simplement qu'un apprenant ne peut être à deux endroits à la fois.

Contrainte n°13 : Un élément de formation ne pourra être planifié pendant une plage d'indisponibilité de l'apprenant concerné. C'est à dire qu'un élément de formation pourra être planifié si tous les apprenants le concernant sont réputés disponibles.

En effet, l'apprenant peut avoir des plages pendant lesquelles il est indisponible (vacances scolaires, périodes d'examen banalisées, *etc.*). Notre système de formation doit donc intégrer ces indisponibilités pour ne pas planifier d'éléments de formation pendant ces plages.

Contrainte n°14 : Le cumul des durées des éléments de formation planifiés sur la même période de référence pour un même apprenant ne pourra excéder un certain volume horaire.

On peut logiquement considérer que les apprenants ne sont pas corvéables à merci et il est donc peut être impossible de planifier 22 heures de formation pour une même journée ! Aussi, en fonction de l'environnement du système de formation, cette contrainte devra être totalement paramétrable.

Contraintes liées aux ressources humaines

Contrainte n°15 : Deux éléments de formation distincts ne pourront être planifiés le même jour à la même heure pour une même ressource humaine.

Cette contrainte, logique, formalise le fait qu'une ressource humaine ne peut intervenir dans deux éléments de formation distincts au même moment.

Contrainte n°16 : La somme des durées des éléments de formation planifiés sur un an concernant une même ressource humaine ne pourra excéder (1+x) fois son service horaire.

Cette contrainte nous permet de limiter le sur-usage des ressources humaines. Ce sur-usage peut être lié à un référentiel extérieur ou à un principe de fonctionnement imposé. Par exemple, en France, un enseignant titulaire ne peut effectuer plus de deux fois le volume d'heures lié à son statut.

Contrainte n°17 : Le domaine maîtrisé par la ressource humaine utilisée par un élément de formation planifié devra être celui correspondant à la thématique dont cet élément de formation planifié dépend.

C'est le bon sens qui nous a orientés vers cette contrainte. Elle précise simplement qu'on ne fera pas enseigner de la mécanique à un enseignant compétant uniquement en arts du spectacle par exemple !

Contrainte n°18 : Un élément de formation ne pourra être planifié pendant une plage d'indisponibilité de la ressource humaine concernée. C'est à dire qu'un élément de formation pourra être planifié si toutes les ressources humaines le concernant sont réputées disponibles sur la plage planifiée.

A l'instar de la contrainte similaire que nous avons évoqué pour les apprenants, on ne pourra solliciter une ressource humaine lorsqu'elle sera indisponible, par exemple pendant des plages de congés mais également par exemple parce qu'une ressource sera, pour raison familiale, indisponible tous les mercredis après-midi.

Contrainte n°19 : Le cumul des durées des éléments de formation planifiés sur la même période de référence pour une même ressource humaine ne pourra excéder un certain volume horaire.

Là encore, on considère qu'une ressource humaine peut comporter des limites d'usage sur une période définie. Par exemple, on ne peut solliciter un enseignant plus de 10 heures par jour et plus de 46 heures par semaine en France.

Contrainte n°20 : La quantité de ressources humaines différentes utilisées pour une même tâche de formation sera limitée.

Les sciences de l'éducation recommandent de limiter le nombre d'intervenants pour des enseignements homogènes dans leur fond ce qui peut être le cas des tâches de formation.

Contraintes liées aux ressources techniques

Contrainte n°21 : Deux éléments de formation distincts ne pourront être planifiés le même jour à la même heure pour une même ressource technique.

Ce type de contrainte est le même que celui existant déjà pour les apprenants et les ressources humaines. Elle intègre simplement le fait qu'une ressource technique n'a pas le don d'ubiquité et ne peut donc être utilisée par deux éléments de formation distincts au même moment.

Contrainte n°22 : Pour un type de ressource technique, la quantité utilisée par un élément de formation planifié devra être égale à la quantité requise par l'élément de formation spécifié lui correspondant.

Lors de la spécification des éléments de formation, on a indiqué la quantité de ressources techniques nécessaires. Cette contrainte précise que le nombre de ressources techniques réellement utilisées devra être égal au nombre prévu.

Contrainte n°23 : Un élément de formation ne pourra être planifié pendant une plage d'indisponibilité de la ressource technique concernée. C'est à dire qu'un élément de formation pourra être planifié si toutes les ressources techniques le concernant sont réputées disponibles sur la plage planifiée.

Une ressource technique pourra bien sûr également être indisponible pendant certaines plages notamment par rapport aux aspects de maintenance desdites ressources techniques.

Contraintes pour le respect des services attendus

Contrainte n°24 : L'apprenant participera aux éléments de formation planifiés qui permettent de l'amener de son référentiel de compétences à celui qu'il désire à travers le service.

Découlant de la première étape qui visait à créer le parcours particulier de l'apprenant, le système de formation doit respecter ce parcours établi pour un apprenant et pour un service de formation attendu.

Bien sûr, la liste de contraintes que nous venons de proposer n'est pas exhaustive et pourrait être amplifiée dans le futur en fonction des besoins du système de formation. Toutefois, toutes ces contraintes n'ont pas la même importance et on peut légitimement s'interroger sur l'intérêt de les respecter formellement dans leur totalité.

b) Classement des contraintes et priorisation

Parmi les contraintes que nous avons présentées, certaines doivent impérativement être satisfaites pour garantir le fonctionnement du système. D'autres, sont des contraintes permettant d'améliorer la qualité pédagogique l'ordonnancement au sein du système de formation mais ne constituent pas un frein au déroulement des processus opérationnels du système de formation. Aussi, nous avons séparé les contraintes en deux catégories : les contraintes « dures » (que le système de formation devra impérativement respecter) et les contraintes « molles » (qui pourront être ignorées sans affecter le fonctionnement du système).

Pour ce classement, nous avons utilisé les numéros de contraintes présentés ci-avant et les recompilons dans le Tableau 16.

Contraintes dures	Contraintes molles
Contrainte n°2	Contrainte n°1
Contrainte n°5	Contrainte n°3
Contrainte n°10	Contrainte n°4
Contrainte n°11	Contrainte n°6
Contrainte n°12	Contrainte n°7
Contrainte n°13	Contrainte n°8
Contrainte n°15	Contrainte n°9
Contrainte n°17	Contrainte n°14
Contrainte n°18	Contrainte n°16
Contrainte n°21	Contrainte n°19
Contrainte n°23	Contrainte n°20
Contrainte n°24	Contrainte n°22

Tableau 16. Classement des contraintes associées au modèle mathématique

c) Formalisation mathématique des contraintes

Afin de pouvoir prendre en compte ces contraintes dans notre modèle, nous devons les exprimer mathématiquement à partir du catalogue de variables que nous avons défini. Nous avons pu constater que certaines contraintes faisaient

appel à des paramètres pouvant être différents en fonction de l'environnement dans lequel évolue le système de formation. Aussi, nous devons rajouter ces paramètres au catalogue de variables existant. Voici donc la liste de ces paramètres supplémentaires :

Paramètres pour la contrainte n°3

Wc le nombre de crédits minimal à réaliser par semestre

Wq le quota maximal autorisé en pourcentage de crédits.

L'expression de la contrainte n°3 devient donc : **La somme des crédits des tâches de formation constituant une phase de formation devra être comprise entre 1 et Wq (avec $Wq \geq 1$) fois le nombre de crédits Wc par semestre.**

Paramètre pour la contrainte n°4

Wh le nombre d'heures de formation correspondant à un crédit de formation.

L'expression de la contrainte n°4 devient donc : **Le nombre des crédits de formation d'une tâche de formation est équivalent à la somme des volumes horaires des éléments de formation spécifiés divisés par Wh.**

Paramètres pour la contrainte n°8

Wg la période de référence (mois, année, semaine, etc.)

Wm le nombre d'heures maximum par thématique par Wg.

L'expression de la contrainte n°8 devient donc : **Le cumul des durées des éléments de formation d'une même thématique planifiés sur la même période de référence Wg pour un même apprenant ne pourra excéder Wm.**

Paramètres pour la contrainte n°9

Wj la période de référence (mois, année, semaine, etc.)

Wk le nombre d'heures maximum par type d'éléments de formation par Wj.

L'expression de la contrainte n°9 devient donc : **Le cumul des durées des éléments de formation d'un même type planifiés sur la même période de référence Wj pour un même apprenant ne pourra excéder Wk.**

Paramètre pour la contrainte n°11

We le nombre d'éléments temporels contenus dans une journée.

L'expression de la contrainte n°11 devient donc : **L'ensemble des éléments temporels au sein desquels est planifié un même élément de formation planifié devront être compris dans une plage $[1 ; We]_{\text{modulo}(We)}$.**

Paramètres pour la contrainte n°12

Wa la période de référence (mois, année, semaine, etc.)

Wb le nombre d'heures maximum par Wa.

L'expression de la contrainte n°12 devient donc : **Le cumul des durées des éléments de formation planifiés sur la même période de référence Wa pour un même apprenant ne pourra excéder Wb.**

Paramètres pour la contrainte n°14

Wd la date de début de service annuel de l'organisme de formation

Ws le quota d'heures supplémentaires admis par année de service

L'expression de la contrainte n°14 devient donc : **La somme des durées des éléments de formation planifiés sur un an à partir de Wd concernant une même ressource humaine ne pourra excéder $(1+Ws)$ fois son service horaire.**

Paramètres pour la contrainte n°17

W_r la période de référence (mois, année, semaine, *etc.*)

W_w le nombre d'heures maximum par W_r .

L'expression de la contrainte n°17 devient donc : **Le cumul des durées des éléments de formation planifiés sur la même période de référence W_r pour une même ressource humaine ne pourra excéder W_w .**

Paramètre pour la contrainte n°18

W_f la quantité maximale de ressources humaines à consommer pour une même tâche de formation.

L'expression de la contrainte n°18 devient donc : **La quantité de ressources humaines différentes utilisées pour une même tâche de formation sera limitée à W_f .**

Paramètres liés aux associations du modèle

Lors du passage de la modélisation UML au modèle relationnel, les associations au niveau du modèle UML ont donné naissance à des relations (tables) permettant de mettre en avant les interactions existant entre les différentes entités (tâches de formation, élément de formation, *etc.*). Aussi, pour la formalisation mathématique des contraintes, il nous fallait trouver un moyen de faire en sorte qu'une association existante puisse avoir une valeur dans les équations représentant les contraintes. Pour cela, nous avons défini plusieurs paramètres qui sont précisés ci-après. Chaque variable indicée peut prendre deux valeurs distinctes en fonction de l'état de l'association à laquelle elle fait référence.

Ces paramètres peuvent donc être définis par :

$$Z_{ba} = \begin{cases} 1 & \text{si l'apprenant } b \text{ participe à la phase de formation } a \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (1)$$

$$Z_{ac} = \begin{cases} 1 & \text{si l'action de formation } c \text{ est incluse dans la phase de formation } a \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2)$$

$$Z_{ec} = \begin{cases} 1 & \text{si la tâche de formation } e \text{ est comprise dans l'action de formation } c \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3)$$

$$Z_{ef} = \begin{cases} 1 & \text{si la thématique } f \text{ est comprise dans la tâche de formation } e \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4)$$

$$Z_{jo} = \begin{cases} Q_{jo} & \text{si le type de ressource technique } o \text{ est requis par l'élément de formation spécifié } j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (5)$$

D'après le catalogue des variables, Q_{jo} représente le nombre de ressources techniques nécessaires pour la réalisation de cet élément de formation

$$Z_{ih} = \begin{cases} 1 & \text{si la ressource humaine } h \text{ maîtrise le domaine } i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (6)$$

$$Z_{dh} = \begin{cases} 1 & \text{si la ressource humaine } h \text{ est indisponible sur l'élément temporel } d \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (7)$$

$$Z_{dg} = \begin{cases} 1 & \text{si la ressource technique } g \text{ est indisponible sur l'élément temporel } d \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (8)$$

$$Z_{db} = \begin{cases} 1 & \text{si l'apprenant } b \text{ est indisponible sur l'élément temporel } d \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (9)$$

Variables associées au modèle

Suivant le même principe que nous avons évoqué précédemment, nous avons été en mesure de définir les variables de notre système. Celles-ci sont donc :

$$x_{bk} = \begin{cases} 1 & \text{si l'apprenant } b \text{ participe à l'élément de formation planifié } k \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (10)$$

$$x_{hk} = \begin{cases} 1 & \text{si la ressource humaine } h \text{ est utilisée par l'élément de formation planifié } k \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (11)$$

$$x_{gk} = \begin{cases} 1 & \text{si la ressource technique } g \text{ est utilisée par l'élément de formation planifié } k \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (12)$$

$$x_{dk} = \begin{cases} 1 & \text{si l'élément de formation planifié } k \text{ se déroule sur l'élément temporel } d \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (13)$$

Ainsi, grâce à l'ensemble des paramètres et variables que nous avons introduits, nous sommes en mesure de formaliser mathématiquement l'ensemble des contraintes décrites ci-avant. Afin d'en faciliter la compréhension, un guide de lecture pour les contraintes les plus complexes figure en annexe 7.

Expression analytique de la contrainte n°1

La phase de formation ne sera lancée que lorsqu'un certain nombre d'apprenants y seront inscrits.

$$\forall a \in A, \sum_{b=1}^B Z_{ba} \geq Aa_a \quad (14)$$

D'après le catalogue de variables, Aa_a représente le nombre minimum d'apprenants pour la phase a.

Expression analytique de la contrainte n°2

La quantité des apprenants participant à un élément de formation planifié devra être inférieure ou égale à la capacité maximale de l'élément de formation spécifié correspondant.

$$\boxed{\forall k \in K, \sum_{b=1}^B x_{bk} \leq Jc_j, Ke_k = Ji_j} \quad (15)$$

D'après le catalogue de variables :

Jc_j représente la capacité maximale de l'élément de formation spécifié j

Ke_k représente l'élément de formation spécifié correspondant à l'élément planifié k

Ji_j représente l'identifiant d'un élément de formation spécifié j

Expression analytique de la contrainte n°3

La somme des crédits des tâches de formation constituant une phase de formation devra être comprise entre 1 et Wq (avec $Wq \geq 1$) fois le nombre de crédits Wc par semestre.

$$\boxed{\forall a \in A, \frac{\sum_{c=1}^C \left[Z_{ac} \sum_{e=1}^E Z_{ec} Ec_e \right]}{(Af_a - As_a)Wc/180} \in [1; Wq]} \quad (16)$$

D'après le catalogue de variables :

Ec_e représente le nombre de crédits de la tâche de formation e

As_a représente la date de début de la phase a

Af_a représente la date de fin de la phase a

Expression analytique de la contrainte n°4

Le nombre des crédits de formation d'une tâche de formation est équivalent à la somme des volumes horaires des éléments de formation spécifiés divisés par Wh .

$$\boxed{\forall e \in E, \frac{\sum_{f=1}^F [Z_{ef} Jd_j]}{Wh} \geq Ec_e, Jt_j = Fi_f} \quad (17)$$

D'après le catalogue de variables :

Jd_j représente la durée de l'élément de formation spécifié j

Ec_e représente le nombre de crédits de la tâche de formation e

Jt_j représente la thématique de l'élément spécifié j

Fi_f représente l'identifiant de la thématique f

Expression analytique de la contrainte n°5

Les précédences définies entre les thématiques et entre les éléments de formation spécifiés devront être respectées.

Soient k_1 et k_2 , $k_1 \in K, k_2 \in K$, tels que l'élément de formation planifié k_1 précède l'élément de formation planifié k_2 .

$$\begin{aligned}
& \forall k_1 \in K, k_2 \in K, b \in B, \\
& x_{bk_1} \cdot \left[\frac{\sum_{d=1}^D (x_{dk_1} \cdot d) - \frac{(Jd_{j_1} \cdot (Jd_{j_1} - 1))}{2}}{Jd_{j_1}} + Jd_{j_1} \right] \leq x_{bk_2} \cdot \left[\frac{\sum_{d=1}^D (x_{dk_2} \cdot d) - \frac{(Jd_{j_2} \cdot (Jd_{j_2} - 1))}{2}}{Jd_{j_2}} \right], \\
& Ke_{k_1} = Ji_{j_1}, Ke_{k_2} = Ji_{j_2}
\end{aligned} \tag{18}$$

Soient t_1 et t_2 , $t_1 \in T, t_2 \in T$, tels que la thématique t_1 précède la thématique t_2 .

Soit $K1$, $K1 \subset K$, l'ensemble des éléments de formations planifiés correspondant à la thématique t_1

Soit $K2$, $K2 \subset K$, l'ensemble des éléments de formations planifiés correspondant à la thématique t_2

$$\begin{aligned}
& \forall k_1 \in K1, k_2 \in K2, b \in B, \\
& x_{bk_1} \cdot \left[\frac{\sum_{d=1}^D (x_{dk_1} \cdot d) - \frac{(Jd_{j_1} \cdot (Jd_{j_1} - 1))}{2}}{Jd_{j_1}} + Jd_{j_1} \right] \leq x_{bk_2} \cdot \left[\frac{\sum_{d=1}^D (x_{dk_2} \cdot d) - \frac{(Jd_{j_2} \cdot (Jd_{j_2} - 1))}{2}}{Jd_{j_2}} \right], \\
& Ke_{k_1} = Ji_{j_1}, Ke_{k_2} = Ji_{j_2}
\end{aligned} \tag{19}$$

D'après le catalogue de variables :

Ke_k représente l'élément de formation spécifié correspondant à l'élément planifié k

Jd_j représente la durée de l'élément de formation spécifié j

Ji_j représente l'identifiant d'un élément de formation spécifié j

Expression analytique de la contrainte n°6

Pour une phase de formation incluant une période de stage, la durée de stage ne pourra pas excéder la moitié de la durée de ladite phase formation.

$$\begin{aligned}
& \forall a \in A, \frac{\sum_{c=1}^C \left[Z_{ac} \sum_{e=1}^E Z_{ec} Ed_e \right]}{\sum_{c=1}^C \left[Z_{ac} \sum_{e=1}^E Z_{ec} Ed_e \right]}, Et_e = Li_l, Ln_l \neq \text{"stage"} > 1, \\
& \sum_{c=1}^C \left[Z_{ac} \sum_{e=1}^E Z_{ec} Ed_e \right] > 0, Et_e = Li_l, Ln_l = \text{"stage"}
\end{aligned} \tag{20}$$

D'après le catalogue de variables :

Ed_e représente la durée en heures de la tâche de formation e

Et_e représente le type de la tâche de formation e

Li_l représente l'identifiant du type de tâche de formation l

Ln_l représente le nom du type de tâche de formation l

Expression analytique de la contrainte n°7

Tous les éléments de formation de même type (Cours, TD, TP,...) d'une même thématique seront assumés par les mêmes ressources humaines pour un même apprenant.

$$\forall f \in F, \forall m \in M, \forall b \in B, \forall h \in H \frac{\sum_{k=1}^K (x_{hk} \cdot x_{bk})}{\sum_{k=1}^K (x_{bk})} = 1, Ke_k = Ji_j, Jt_j = Fi_f, Je_j = Mi_m \quad (21)$$

D'après le catalogue de variables :

Ke_k représente l'élément de formation spécifié correspondant à l'élément planifié k

Ji_j représente l'identifiant d'un élément de formation spécifié j

Jt_j représente la thématique de l'élément spécifié j

Fi_f représente l'identifiant de la thématique f

Je_j représente le type de l'élément de formation spécifié j

Mi_m représente l'identifiant du type d'élément de formation m

Expression analytique de la contrainte n°8

Le cumul des durées des éléments de formation d'une même thématique planifiés sur la même période de référence Wg pour un même apprenant ne pourra excéder Wm .

$$\forall f \in F, \forall b \in B, \forall i \text{ mod}(Wg), \sum_{d=i}^{i+Wg} \sum_{k=1}^K (x_{dk} \cdot x_{bk}) \leq Wm, Ji_j = Ke_k, Jt_j = Fi_f \quad (22)$$

D'après le catalogue de variables :

Ke_k représente l'élément de formation spécifié correspondant à l'élément planifié k

Ji_j représente l'identifiant d'un élément de formation spécifié j

Jt_j représente la thématique de l'élément de formation spécifié j

Fi_f représente l'identifiant de la thématique f

Expression analytique de la contrainte n°9

Le cumul des durées des éléments de formation d'un même type planifiés sur la même période de référence Wj pour un même apprenant ne pourra excéder Wk .

$$\forall m \in M, \forall b \in B, \forall i \text{ mod}(Wj), \sum_{d=i}^{i+Wj} \sum_{k=1}^K (x_{dk} \cdot x_{bk}) \leq Wk, Ji_j = Ke_k, Je_j = Mi_m \quad (23)$$

D'après le catalogue de variables :

Ke_k représente l'élément de formation spécifié correspondant à l'élément planifié k

Ji_j représente l'identifiant d'un élément de formation spécifié j

Je_j représente le type d'un élément de formation spécifié j

Mi_m représente l'identifiant d'un type d'élément de formation m

Expression analytique de la contrainte n°10

Chaque élément de formation planifié sera réalisé en une seule fois.

$$\forall d \in D, \forall k \in K, \sum_{i=1}^D \left[\sum_{d=i}^{i+Jd_j} (x_{dk}) \right]^2 \geq \frac{Jd_j \cdot (2 \cdot Jd_j^2 + 1)}{3}, Ke_k = Ji_j \quad (24)$$

D'après le catalogue de variables :

Ke_k représente l'élément de formation spécifié correspondant à l'élément planifié k

Ji_j représente l'identifiant d'un élément de formation spécifié j

Jd_j représente la durée de l'élément de formation spécifié j

Expression analytique de la contrainte n°11

L'ensemble des éléments temporels au sein desquels est planifié un même élément de formation planifié devront être compris dans une plage $[1 ; We]_{\text{modulo}(We)}$.

$$\forall k \in K, \left(\frac{\sum_{d=1}^D (x_{dk} \cdot d) - \frac{(Jd_j \cdot (Jd_j - 1))}{2}}{Jd_j} \right)_{\text{Modulo}(We)} + Jd_j \leq We, Ke_k = Ji_j \quad (25)$$

D'après le catalogue de variables :

Ke_k représente l'élément de formation spécifié correspondant à l'élément planifié k

Ji_j représente l'identifiant d'un élément de formation spécifié j

Jd_j représente la durée de l'élément de formation spécifié j

Expression analytique de la contrainte n°12

Deux éléments de formation distincts ne pourront être planifiés le même jour à la même heure pour un même apprenant.

$$\forall b \in B, \forall d \in D, \sum_{k=1}^K (x_{bk} \cdot x_{dk}) \leq 1 \quad (26)$$

Expression analytique de la contrainte n°13

Un élément de formation ne pourra être planifié pendant une plage d'indisponibilité de l'apprenant concerné. C'est à dire qu'un élément de formation pourra être planifié si tous les apprenants le concernant sont réputés disponibles.

$$\forall k \in K, \forall b \in B, \forall d \in D, x_{bk} + x_{dk} + Z_{db} < 3 \quad (27)$$

Expression analytique de la contrainte n°14

Le cumul des durées des éléments de formation planifiés sur la même période de référence Wa pour un même apprenant ne pourra excéder Wb .

$$\forall b \in B, \forall i \text{ mod}(Wa), \sum_{d=i}^{i+Wa} (x_{dk} \cdot x_{bk}) \leq Wb \quad (28)$$

Expression analytique de la contrainte n°15

Deux éléments de formation distincts ne pourront être planifiés le même jour à la même heure pour une même ressource humaine.

$$\forall h \in H, \forall d \in D, \sum_{k=1}^K (x_{hk} \cdot x_{dk}) \leq 1 \quad (29)$$

Expression analytique de la contrainte n°16

La somme des durées des éléments de formation planifiés sur un an à partir de Wd concernant une même ressource humaine ne pourra excéder (1+Ws) fois son service horaire.

$$\forall h \in H, \sum_{k=1}^K x_{hk} Jd_j \leq (1+Ws)Nh_n, Ht_h = Ni_n, Ke_k = Ji_j \quad (30)$$

D'après le catalogue de variables :

Ht_h représente le type de la ressource humaine h

Ke_k représente l'élément de formation spécifié correspondant à l'élément planifié k

Ji_j représente l'identifiant d'un élément de formation spécifié j

Jd_j représente la durée de l'élément de formation spécifié j

Ni_n représente l'identifiant du type de ressource humaine n

Nh_n représente le service horaire du type de ressource humaine n

Expression analytique de la contrainte n°17

Le domaine maîtrisé par la ressource humaine utilisée par un élément de formation planifié devra être celui correspondant à la thématique dont cet élément de formation planifié dépend.

$$\forall h \in H, \forall k \in K, \forall i \in I, (Z_{hi} \cdot x_{hk}) = 1, Ke_k = Ji_j, Jt_j = Fi_f, Fd_f = Ii_i \quad (31)$$

D'après le catalogue de variables :

Fd_f représente le domaine de la thématique f

Fif représente l'identifiant de la thématique f

Ii_i représente l'identifiant du domaine i

Jij représente l'identifiant d'un élément de formation spécifié j

Jt_j représente la thématique de l'élément spécifié j

Ke_k représente l'élément de formation spécifié correspondant à l'élément planifié k

Expression analytique de la contrainte n°18

Un élément de formation ne pourra être planifié pendant une plage d'indisponibilité de la ressource humaine concernée. C'est à dire qu'un élément de formation pourra être planifié si toutes les ressources humaines le concernant sont réputées disponibles sur la plage planifiée.

$$\forall k \in K, \forall h \in H, \forall d \in D, x_{hk} + x_{dk} + Z_{hd} < 3 \quad (32)$$

Expression analytique de la contrainte n°19

Le cumul des durées des éléments de formation planifiés sur la même période de référence Wr pour une même ressource humaine ne pourra excéder Ww .

$$\forall h \in H, \forall i \bmod(Wr), \sum_{d=i}^{i+Wr} (x_{dk} \cdot x_{hk}) \leq Ww \quad (33)$$

Expression analytique de la contrainte n°20

La quantité de ressources humaines différentes utilisées pour une même tâche de formation sera limitée à Wf .

$$\forall e \in E, \sum_{h=1}^H \sum_{k=1}^K Z_{ef} x_{hk} \leq Wf, Ke_k = Ji_j, Jt_j = Fi_f \quad (34)$$

D'après le catalogue de variables :

Ke_k représente l'élément de formation spécifié correspondant à l'élément planifié k

Ji_j représente l'identifiant d'un élément de formation spécifié j

Jt_j représente la thématique de l'élément spécifié j

Fi_f représente l'identifiant de la thématique f

Expression analytique de la contrainte n°21

Deux éléments de formation distincts ne pourront être planifiés le même jour à la même heure pour une même ressource technique.

$$\forall g \in G, \forall d \in D, \sum_{k=1}^K (x_{gk} \cdot x_{dk}) \leq 1 \quad (35)$$

Expression analytique de la contrainte n°22

Pour un type de ressource technique, la quantité utilisée par un élément de formation planifié devra être égale à la quantité requise par l'élément de formation spécifié lui correspondant.

$$\forall k \in K, \forall o \in O, \sum_{g=1}^G x_{gk} = Z_{oj}, Ke_k = Ji_j, Gt_g = Oi_o \quad (36)$$

D'après le catalogue de variables :

Ke_k représente l'élément de formation spécifié correspondant à l'élément planifié k

Ji_j représente l'identifiant d'un élément de formation spécifié j

Gt_g représente le type de la ressource technique g

Oi_o représente l'identifiant du type de ressource technique o

Expression analytique de la contrainte n°23

Un élément de formation ne pourra être planifié pendant une plage d'indisponibilité de la ressource technique concernée. C'est à dire qu'un élément de formation pourra être planifié si toutes les ressources techniques le concernant sont réputées disponibles sur la plage planifiée.

$$\boxed{\forall k \in K, \forall g \in G, \forall d \in D, x_{gk} + x_{dk} + Z_{gd} < 3} \quad (37)$$

Expression analytique de la contrainte n°24

L'apprenant participera aux éléments de formation planifiés qui permettent de l'amener de son référentiel de compétences à celui qu'il désire à travers le service.

Soit F_b l'ensemble des thématiques f que doit acquérir l'apprenant b

$$\boxed{\forall b \in B, \forall f \in F_b, \sum_{k=1}^K x_{bk} = 1, Ke_k = Ji_j, Jt_j = Fi_f} \quad (38)$$

D'après le catalogue de variables :

Ke_k représente l'élément de formation spécifié correspondant à l'élément planifié k

Ji_j représente l'identifiant d'un élément de formation spécifié j

Jt_j représente la thématique de l'élément spécifié j

Fi_f représente l'identifiant de la thématique f

d) Définition de la fonction objective

Le modèle que nous présentons se révèle complexe et sa résolution analytique peut s'avérer difficile à mettre en œuvre. Toutefois, dans l'espace des solutions satisfaisant à l'ensemble des contraintes, nous cherchons à dégager celle ou celles qui maximiseraient la qualité du service (tant sur le service de formation en tant que tel, que sur le fonctionnement général du système de formation). Ainsi, dans le modèle que nous proposons, nous avons choisi de favoriser la mutualisation des ressources (apprenants, ressources techniques et humaines) autour de même éléments de formation planifiés. Autrement dit, nous essayons de travailler à pleine capacité de production. En effet, en minimisant le nombre d'éléments planifiés, on optimise le système car l'appel aux ressources est ainsi réduit. Cela permet donc de façon indirecte de réduire les coûts, les délais, mais également la qualité des services de formation rendus en disposant d'un ordonnancement au plus près des besoins exprimés. Le critère de capacité maximale d'accueil pour un élément de formation spécifié sera donc déterminant car il déterminera combien d'éléments de formation planifiés lui correspondant seront nécessaires pour former l'ensemble des apprenants pour lesquels cet élément de formation spécifié apparaît dans leur parcours.

Dans ce cas, notre fonction objective ou fonction économique pourra se résumer à la minimisation du nombre d'éléments de formations planifiés rattachés et donc à l'occupation des éléments temporels par ces derniers. Analytiquement, elle s'exprimera ainsi :

$$\boxed{f_{eco} = Min \left(\sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^K z_{dk} \right)} \quad (39)$$

Forts des contraintes et de la fonction économique exprimés de façon analytique, nous pouvons à présent nous focaliser sur la recherche de solutions à notre problème.

e) Approche pour la résolution du problème sous contraintes

À la lecture des contraintes que nous avons présentées dans la partie précédente, nous présentons notre approche pour la résolution de ce problème et mettons en avant la complexité qui lui est liée.

En effet, certaines contraintes font que ce modèle de résolution mathématique ne peut être traité par l'usage seul de la programmation linéaire. C'est le cas des contraintes 5, 8, 10, 12, 14, 15, 19 et 21 qui sont quadratiques. Aussi, nous voyons apparaître ici une profonde divergence par rapport à certains systèmes de production de biens et de services. En effet, dans le cadre des systèmes de formation, on ne connaît pas à l'avance le nombre d'activités qu'il nous faut planifier. Ainsi, pour chaque élément temporel, le fait qu'une activité de formation (élément de formation planifié) existe est incertain et doit donc être matérialisé par une variable binaire x_{dk} portée à 1 si l'élément de formation planifié k existe sur l'élément temporel d . Ce problème seul pourrait être résolu mais un autre problème apparaît lié au fait que l'on ignore *a priori* quel produit (apprenant) sera transformé par quelle activité (élément de formation planifié). Cela a donc pour incidence que la seule façon de représenter la participation d'un apprenant à un élément de formation planifié à un instant du temps précis, et donc de déclarer la réservation de l'apprenant pour un élément temporel, est d'introduire un produit des variables x_{bk} et x_{dk} . Le résultat de ce produit valant 1 signifierait que l'apprenant b est occupé sur l'élément temporel d pour la réalisation de l'élément de formation k . On retrouve le même problème pour l'analyse des réservations des autres ressources techniques ou humaines. Ce produit de variables a donc pour incidences que plusieurs contraintes ne sont pas linéaires et notre modèle mathématique ne peut ainsi pas être résolu grâce aux outils de programmation linéaire ; il est considéré NP-difficile. Toutefois, de nombreuses pistes pour la résolution de ce système de contraintes restent envisageables comme par exemple l'usage des méthodes de résolutions heuristiques par séparation, évaluation (PSE⁶⁰).

Grâce à l'application de ce type de démarche, le système disposera ainsi d'un ordonnancement complet satisfaisant à l'ensemble des contraintes et cherchant à maximiser l'aspect mutualisation comme nous l'avons évoqué lors de la présentation de la fonction objective que nous avons retenue. Nous détaillerons cette vision lors de l'évocation des perspectives offertes par nos travaux.

Afin de faciliter l'ultime étape qui permettra la résolution du modèle mathématique, nous avons poursuivi le développement de notre outil pour permettre la génération automatique du modèle mathématique, de la définition des variables et enfin de la fonction objective. Ainsi, une interface particulière développée sous Labview® permet de choisir quelles seraient les contraintes qui vont être prises en compte dans le modèle mathématique. Par la suite, on peut donc générer la liste des contraintes en fonction d'un langage spécifique. Ici, nous avons choisi le langage admis par LP solve®, logiciel servant à la résolution de problèmes linéaires nous ayant permis de valider les contraintes de type linéaire.

Nous présentons donc sur la Figure 34 l'interface développée pour notre outil et permettant de sélectionner les contraintes que l'on souhaite prendre en compte

⁶⁰ PSE : Procédure de Séparation Évaluation, également appelé selon le terme anglo-saxon branch and bound. C'est une méthode d'énumération implicite: toutes les solutions possibles du problème peuvent être énumérées mais, l'analyse des propriétés du problème permet d'éviter l'énumération de larges classes de mauvaises solutions. Dans un bon algorithme par séparation et évaluation, seules les solutions potentiellement bonnes sont donc énumérées.

pour la création du modèle mathématique général. La Figure 35, quant à elle, présente une vue du programme Labview® permettant de générer la contrainte 10. Nous pouvons rappeler que la programmation Labview® s'effectue en G, langage graphique consistant en l'assemblage de composants élémentaires auxquels sont associées des fonctions pouvant être très simples (par exemple : addition de a et b) comme très évoluées (par exemple : exploiter le codage de déplacement du pointeur de souris). Ces composants sont interconnectés par des liaisons « fils » représentant les flux de données. L'ensemble de ces éléments peut être séquencé à travers des structures cycliques itératives, conditionnelles, *etc.* Les différentes variables, commandes ou indicateurs, peuvent trouver leur représentation au sein d'une interface utilisateur dédiée. Un fichier Labview® (VI pour Virtual Instrument) est ainsi composé de deux parties distinctes :

- La face avant permettant l'interface avec l'opérateur ;
- Le diagramme dans lequel sont disposés les éléments de programmation.

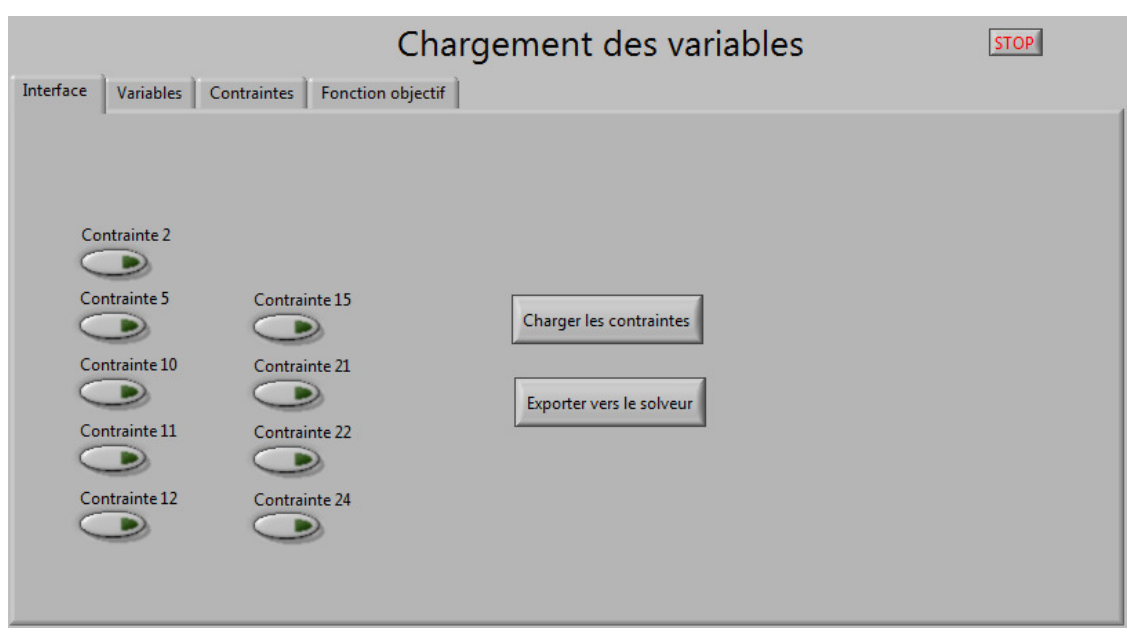


Figure 34. Face avant de l'Interface pour la sélection des contraintes à appliquer au modèle

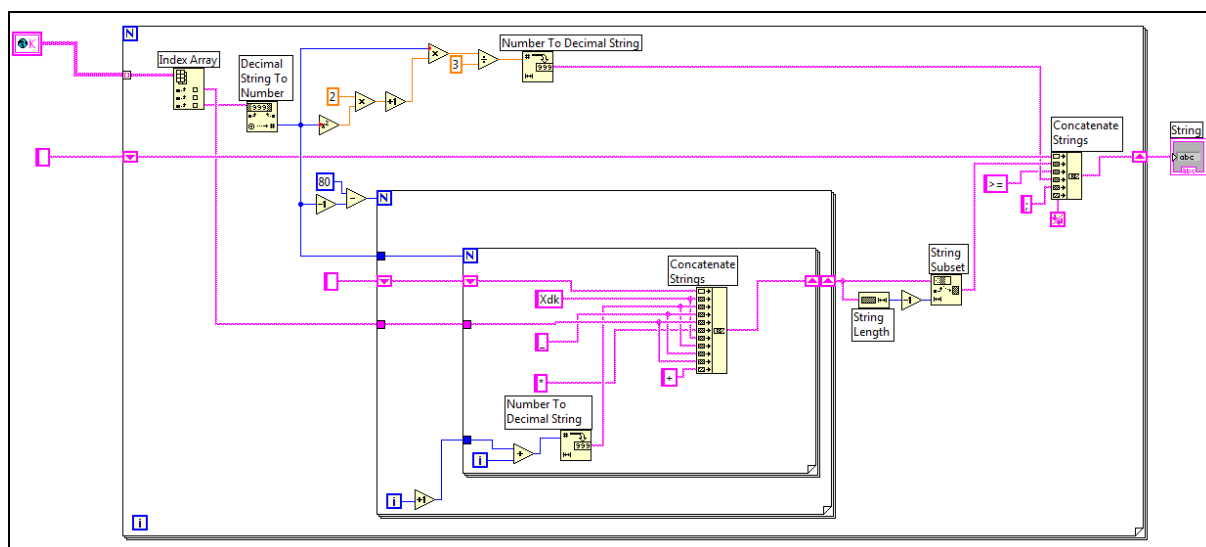


Figure 35. Diagramme pour la création automatisée de la contrainte n°10

Par le biais de cet outil d'interfaçage complet, il nous est donc possible à présent de dialoguer de façon générale avec notre base de données dans laquelle résident les différentes informations relatives au système de formation. Forts de ce dialogue, nous sommes en mesure d'assurer, par l'étape de planification, la capacité de notre système à assumer une offre de formation, puis de générer un modèle mathématique associé aux contraintes désirées par l'utilisateur. À ce jour, nous n'avons pas pu aborder la résolution de ce modèle mathématique car comme nous l'avons précisé ci-avant, la programmation linéaire (solution simple de résolution en recherche opérationnelle) n'est pas viable pour notre modèle. Il faudra donc solliciter des spécialistes de recherche opérationnelles pour le développement d'algorithmes d'exploration particuliers pour la recherche de solutions. Le but de cette recherche est de trouver non pas une solution optimale, mais une « bonne » solution. Cette « bonne » solution est définie comme une solution satisfaisant l'ensemble des contraintes et dont la performance au regard de la fonction économique est acceptable par rapport au degré d'aspiration du décideur.

Pour conclure ce chapitre, nous présentons par la Figure 36 notre démarche globale associée aux différents outils que nous avons exploités ou développés. On peut donc noter sur cette figure que pour la partie résolution, à ce jour, nous ne disposons pas d'outils en mesure de générer une ou des solutions acceptables.

En reprenant le déroulement présenté par cette figure, nous illustrons nos travaux par leur mise en œuvre autour d'un cas applicatif que nous présentons au chapitre 3.

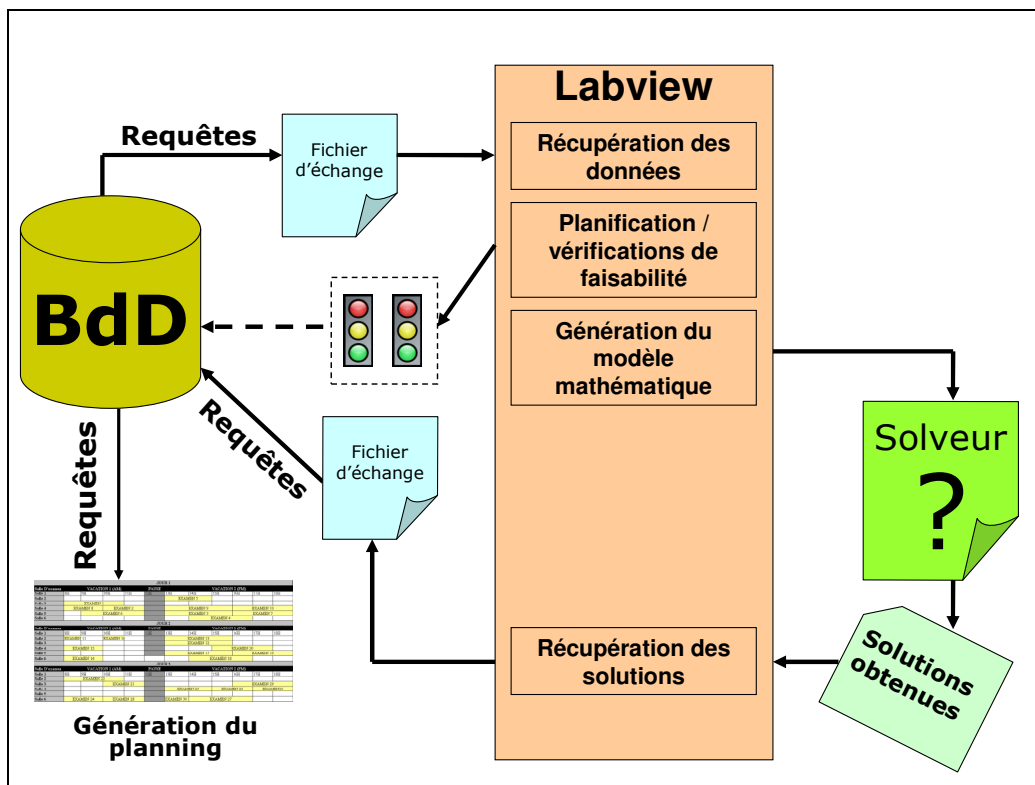


Figure 36. Démarche globale associée aux outils

3. Application

Dans ce chapitre, nous cherchons à faire état de la pertinence de nos travaux en présentant un exemple autour duquel l'ensemble des méthodes et outils que nous proposons ont été appliqués. Ainsi, nous nous sommes tournés vers le cas de la Licence Professionnelle « Gestion de la Production Industrielle » proposée par l'Université Paul Verlaine de Metz. Nous présenterons donc dans ce dernier chapitre les différentes étapes qui nous ont permis de réaliser la réingénierie de ce service de formation.

A. Présentation du cas de la Licence Professionnelle GPI

Pour traiter notre exemple explicatif, nous nous sommes appuyés sur un service de formation déjà existant au sein de l'Université Paul Verlaine de Metz : La Licence Professionnelle Gestion de la Production Industrielle. Cette formation a été proposée à partir de 2003 et a été créée pour répondre à une véritable demande industrielle afin de disposer d'assistants d'ingénieurs hautement qualifiés capables de mettre en place au sein des entreprises des méthodes et outils de réorganisation industrielle et donc spécialisés en organisation industrielle, logistique ou en automatisation industrielle. En particulier, le diplômé pourra intervenir dans des projets portant sur l'amélioration de la qualité, des coûts, des délais et de la réactivité tout au long du cycle de vie du système de production, la maîtrise des installations en production automatisée ou encore pourra être amené à accompagner l'entreprise dans sa gestion du changement au quotidien.

De plus, les compétences acquises lui permettront d'être capable de réorganiser les services, les ateliers de production ou les zones d'entreposage, de savoir évaluer la performance, de rationaliser les flux, de mettre en place des indicateurs de performance, d'automatiser certaines fonctions de production, de mettre en place les nouveaux systèmes de gestion de production, de prévoir l'intégration des systèmes de production et de logistique ou encore d'organiser des tournées ainsi que l'expédition ou la réception des produits et matières.

Bien sûr, cela impliquait une forte connaissance de la culture d'entreprise et c'est aussi en cela que la Licence Professionnelle GPI a su se démarquer d'autres formations. Nous avons choisi de traiter pour exemple cette Licence Professionnelle pour deux raisons. La première, c'est qu'elle constitue un véritable projet de réingénierie de formation et la seconde, c'est qu'elle reste raisonnable du point de vue de sa complexité. Elle nous permettra ainsi de montrer l'intérêt de notre contribution à partir d'un exemple simple.

B. Identification de l'offre Licence Professionnelle

En cohérence avec les théories que nous avons évoquées tout au long de cette thèse, l'offre de la Licence Professionnelle doit répondre à un réel besoin exprimé par des clients.

- Le premier besoin exprimé est bien sûr celui émis par le monde professionnel. La logique de plus en plus concurrentielle pousse les entreprises à multiplier les projets d'amélioration continue et c'est en ce sens qu'un énorme besoin est exprimé en terme de personnels qualifiés pouvant définir les modalités de l'amélioration continue mais également capables d'accompagner le changement par le biais de méthodes et outils appropriés aux objectifs, au secteur industriel ou encore à l'environnement du système de production de biens et de services. C'est à ce besoin que souhaite répondre

la licence professionnelle en fournissant aux entreprises des techniciens hautement qualifiés capables d'assister l'ingénierie dans les missions d'amélioration continue que sont les siennes. Bien sûr, outre l'accompagnement du changement, ces personnels devront également être force de proposition ;

- Le second besoin exprimé est celui des étudiants. En fait, deux profils d'étudiants bien distincts trouvent un intérêt dans cette formation. Les premiers, issus du système universitaire et ayant validé une deuxième année de licence (niveau L2 selon le LMD), souhaitent donner un véritable caractère professionnalisant à leur formation et souhaitent que leur dernière année du cycle de Licence leur permette de s'orienter vers le secteur de l'emploi à l'issue de la formation. Il est ainsi important de rappeler que l'université française, dans ses cycles généraux, reste en grande majorité dédiée à la formation à la recherche et n'a pas pour finalité la professionnalisation des étudiants. C'est ainsi à un besoin nouveau de professionnalisation que répond la Licence Professionnelle GPI. Toutefois, d'autres profils d'étudiants sont intéressés par cette licence. Ce sont les étudiants issus de formations professionnalisantes techniques (BTS, DUT, *etc.*) qui souhaitent compléter leur formation par une vue s'approchant de l'ingénierie où l'esprit de synthèse et d'analyse sera mis en avant.

Ainsi, on met en évidence le fait que cette licence professionnelle a une réelle vocation professionnalisante et l'issue logique de cette dernière reste le monde du travail. Enfin, il est important de noter que les flux de la licence sont assez réduits puisqu'ils avoisinent la trentaine d'élèves. Aussi, et par soucis de mutualisation, nous avons considéré que le référentiel de compétences des élèves entrants est homogène quelque soit leur origine (BTS, DUT, L2 universitaire, *etc.*). Cette hypothèse nous permettra également de simplifier, pour l'exemple, les parcours apprenant.

Il est également fondamental de noter que nous avons, pour répondre aux préoccupations industrielles, proposé deux cartes de compétences pour les diplômés. Une orientée Organisation Industrielle et Logistique, et l'autre orientée Automatisation Industrielle. De nombreuses compétences seront bien évidemment communes à ces deux spécialités mais une divergence interviendra sur certaines d'entre elles.

C. Génération du parcours apprenant

Afin de réaliser un parcours apprenant cohérent pour chacune des deux spécialités de la Licence Professionnelle GPI, nous avons établi un référentiel de compétences cibles attendues par les futurs recruteurs. À partir de ces compétences cibles, nous avons défini l'ensemble du graphe de précédences permettant de voir figurer l'ensemble des pré-requis existants entre les compétences mais également entre les éléments de formations spécifiés faisant référence à une même compétence. Il est en effet important de pouvoir indiquer, pour une compétence donnée, que l'on souhaiterait pouvoir réaliser quelques cours magistraux avant d'aborder par exemple les travaux pratiques.

Comme nous l'avons précisé précédemment, nous avons considéré que l'ensemble des étudiants s'inscrivant dans la licence professionnelle possède le même référentiel de compétences et c'est pourquoi on ne verra se profiler que deux parcours apprenant distincts, celui correspondant à la spécialité Organisation Industrielle et Logistique et celui faisant référence à la spécialité. Toutefois, si un apprenant possède déjà une ou plusieurs des compétences prévues dans le parcours de formation, il est évident qu'il n'aura pas à suivre l'ensemble des éléments de formation spécifiés faisant référence à ces compétences. Ce sera par exemple le cas pour les élèves qui n'ont pas pu valider

l'année précédente toutes les compétences attendues mais qui en possèdent déjà une partie.

La Figure 37 et la Figure 38 présentent quelques vues sur l'outil qui nous a permis de définir les parcours apprenants.

Éléments de formation spécifiés

Recherche : 121

Thématique concernée : Analyse de données introduction & systèmes n

Type d'élément de formation : Travaux Dirigés

Durée de l'élément (heure) : 2

Capacité Maximale : 32

Sélection du type de ressource humaine :

Quantité : * compétence :

Ajouter ce type de ressource humaine

Type	Quantité	Compétence
Enseignant	1	0

Élément de formation précédent :

Ajouter l'élément sélectionner comme précédent

Id	Nom	Durée
120	Cours magistral	2

Sélection du type de ressource technique :

Quantité ::

Ajouter ce type de ressource technique

Type	Quantité
Salle de TD	1

Ajouter Annuler Valider

Figure 37. Formulaire pour la définition des éléments de formation spécifiés

Tâches de formation

Recherche :

Nom : UE01 automatisation et

Nombre de Crédits : 5

Durée (heures) : 48

Type de tâche : UE théorique

Sélection d'une thématique :

Ajouter la thématique sélectionnée

- Automatique introduction & schéma fonctionnel
- Automatique Laplace et fonction transfert
- Automatique premier ordre & deuxième ordre
- Automatique notion de stabilité
- Automatique matlab
- Plan d'expérience partie 1

Ajouter Annuler Valider

Figure 38. Formulaire pour la définition des actions de formation

Nous pouvons noter également que la définition des actions de formation (agrégations de compétences) a été réalisée en se conformant aux référentiels européens en termes de nombre de crédits associés (ECTS) et de désignation. Au même titre, les actions de formation ont été désignées par le sigle UE signifiant Unité d'Enseignement et répondant ainsi aux référentiels requis par l'université Paul Verlaine de Metz.

Une fois renseigné le graphe de précédences ainsi que les compétences cibles à atteindre par les apprenants pour les deux spécialités de la Licence Professionnelle, nous avons exploité notre outil de génération des parcours apprenant ce qui nous a permis de valider la définition des précédences renseignées. En outre, nous avons généré, grâce à la simulation du RdP associé, une batterie de gammes de formations envisageables pour le déroulement des deux parcours et ce par le biais de notre outils de simulation. Toutefois, nous n'avons pas, à ce stade, valorisé une solution par rapport à une autre. Par la suite, on pourrait choisir de valoriser une gamme par rapport aux autres en intégrant la notion de cycle de vie des compétences et en cherchant à rapprocher temporellement deux éléments pré-requis les uns par rapport aux autres.

D. Planification de la Licence Professionnelle

À partir du parcours apprenant constitué pour l'ensemble des apprenants, nous sommes en mesure de réaliser lors de la planification un ensemble de vérifications sur la cohérence des informations renseignées mais également les capacités du système en termes de ressources humaines et techniques. Aussi, après avoir renseigné dans la base de données l'ensemble des caractéristiques des ressources humaines et techniques, nous avons appliqué une batterie de vérifications permettant d'alerter de façon détaillée le concepteur d'une éventuelle incohérence dans les données (les volumes horaires par exemple) ou d'une incapacité de ce dernier à réaliser les formations sollicités par un certain nombre d'apprenants. Nous pouvons rappeler que ces vérifications s'appuient sur les contraintes évoquées au chapitre 2 qui ne font pas appel aux variables du système mais seulement à ses paramètres initiaux. C'est le cas par exemple des contraintes 1, 3 ou encore 6. Notons que certaines sont des versions simplifiées de certaines contraintes où par exemple on va chercher à appliquer la contrainte 16 non pas sur les éléments de formation planifiés mais sur une version critique déclinée à partir des éléments de formation spécifiés (donc ne faisant pas appel aux variables). En effet, on considèrera que les ressources humaines, disposant d'un service horaire à assumer sur la période, ne devront pas dépasser ce service. Cela pourra donc alerter le concepteur de la Licence que s'il veut lancer sa formation, il pourra le faire sans qu'aucune de ses ressources humaines n'ait d'heures supplémentaires à effectuer. Critère qui pourrait faire partie des axes de performance définis lors de la création de la Licence Professionnelle. Pour déterminer le nombre critique (le plus petit) d'éléments de formation planifiés qui devront être effectués, nous avons mis en vis-à-vis pour, chaque élément de formation spécifié, la capacité d'accueil maximal de celui-ci avec le nombre d'étudiants qui devront y participer. Ainsi après une rapide division de ces deux éléments, arrondie à l'entier immédiatement supérieur, on dispose des informations désirées. Il ne reste plus qu'à rapprocher les ressources humaines des éléments de formations spécifiés et on est en mesure de détecter une insuffisance en terme de ressources humaines.

Concernant les ressources techniques, la démarche est plus simple puisqu'il nous faut juste garantir que le nombre de ressources techniques nécessitées par chaque élément de formation spécifié est disponible.

La Figure 39 présente l'interface permettant d'effectuer une vérification sur la cohérence des volumes horaires agrégés au niveau des tâches de formation (UE) par

rapport aux éléments de formation spécifiés que chacune d'entre elles est censée contenir.

The interface has four tabs: 'Interface BdD', 'Vérification Horaire' (selected), 'Vérification RH', and 'Chargement variables/contraintes de base'. A button 'Lancer la vérification horaire' is on the left. A red warning box states: '3 tâche(s) de formation comporte(nt) un problème de volume horaire!!'. Below is a table with three columns: 'Tâche de formation :', 'Horaire indiqué :', and 'Horaire réel :'. The table contains three rows of data.

Tâche de formation :	Horaire indiqué :	Horaire réel :
UE03 Fondements mathématiques	44,00	40
UE07 OIL évaluation de systèmes	48,00	40
UE07 AI supervision	48,00	34

Figure 39. Interface pour la vérification des volumes horaires lors de la planification

Pour poursuivre sur l'axe des vérifications, notre outil permet également une vérification des capacités en ressources humaines et techniques et apporte des éléments permettant d'identifier avec précision une éventuelle source de problème. La Figure 40 présente l'interface assurant la vérification de capacités de charge.

The interface has four tabs: 'Interface BdD', 'Vérification Horaire', 'Vérification RH' (selected), and 'Chargement variables/contraintes de base'. A button 'Lancer la vérification des ressources' is on the left. A green status indicator (light) is next to the text: 'Pas de problèmes détectés en terme de capacités de ressources humaines'. A red status indicator (light) is next to the text: '1 problème(s) détecté(s) en terme de capacités de ressources techniques'. Below is a table with three columns: 'Nom du type RT :', 'Qté max sollicitée :', and 'Quantité disponible'. The table contains one row of data.

Nom du type RT :	Qté max sollicitée :	Quantité disponible
Licence du logiciel Matlab	12	8

Figure 40. Présentation de l'interface pour la vérification des capacités ressources

Enfin, évidemment ces interfaces sont interconnectées au diagramme Labview® permettant d'assurer lesdites vérifications. La Figure 41 présente le diagramme permettant d'assurer la vérification horaire présentée ci-avant.

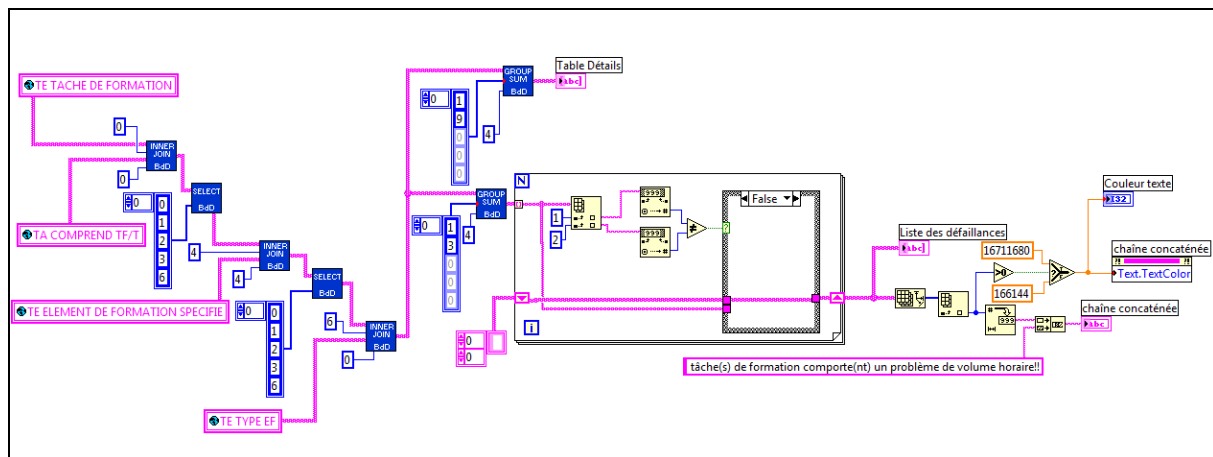


Figure 41. Diagramme correspondant à la vérification de la cohérence horaire

Ces vérifications étant établies, nous pouvons générer le modèle mathématique qui servira à l'ordonnancement des formations. Grâce à ces vérifications, on s'assure qu'en cas d'absence de solution, cela ne pourra pas avoir pour origine la capacité du système en ressources techniques et humaines.

E. Génération du modèle mathématique

La spécification du système de formation telle que renseignée dans la base de données étant réputée cohérente et réalisable grâce à l'étape de planification, il est possible de générer le modèle mathématique qui servira à produire à terme l'ordonnancement complet du système. Aussi, notre outil permet la génération des différentes contraintes ainsi que leur agrégation pour l'export dans le solveur. À ce jour, nous rappelons que la méthode de résolution n'est pas arrêtée et nécessitera une contribution scientifique dans le secteur de la recherche opérationnelle. Le cas de la licence professionnelle que nous avons présenté jusqu'à présent est relativement dense puisqu'il compte 211 éléments de formation spécifiés, 28 apprenants, 15 ressources humaines et 8 ressources techniques. La licence professionnelle se déroule sur 32 semaines à raison de 40 heures par semaines planifiables (40 éléments temporels par semaine). Aussi, on peut anticiper sur le dénombrement de variables binaires qui vont intervenir au sein de notre modèle :

- $X_{hk} : 15 \times 3 \times 165 = 47\,475$;
- $X_{gk} : 8 \times 3 \times 165 = 25\,320$;
- $X_{bk} : 28 \times 3 \times 165 = 88\,620$;
- $X_{dk} : 32 \times 40 \times 3 \times 165 = 4\,051\,200$.

Le total des variables binaires au sein de ce système représente donc plus de 4 millions de variables. Aussi, afin de faciliter la lecture des contraintes, variables et définition de la fonction objectif, nous avons choisi de réduire le nombre de variables (et donc le nombre de contraintes associées) en créant un exemple simpliste permettant de tester l'ensemble de nos contraintes. Cet exemple, de petite taille, sera planifié sur 10 jours, comptera 3 ressources techniques, 4 ressources humaines maîtrisant le même domaine de compétence. Il comptera 5 thématiques (compétences) à acquérir. Nous présentons le parcours associé à ce service de formation à la Figure 42. L'ensemble des thématiques ou compétences ici présentées correspondront au même domaine à savoir les mathématiques.

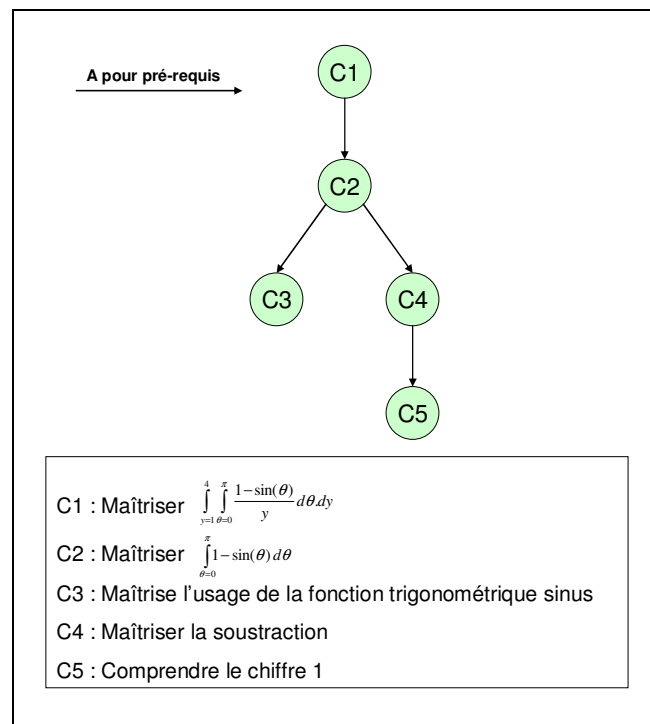


Figure 42. Description des compétences associées à notre exemple

Bien sûr, plusieurs éléments de formations spécifiés (Cours, TD, TP) constituent chacun des processus d'acquisition de compétences (C1, C2, C3, C4 et C5). Afin de ne pas complexifier démesurément notre problème, nous avons choisi de limiter à trois le nombre d'éléments de formation spécifiés associés à une thématique. Le Tableau 17 présente un résumé synthétique des caractéristiques de ces éléments de formation spécifiés en reprenant leur nom, leur type, la durée ainsi que la capacité maximale d'accueil de chacun. Cette capacité d'accueil est volontairement relativement faible afin que le système soit contraint à devoir répéter plusieurs fois un même élément de formation spécifié afin de transformer tous les apprenants.

		Durée	Capacité MAX
Composants de C1			
EF1a	TP	4h	5
EF1b	TP	4h	5
Composants de C2			
EF2a	Cours	2h	10
EF2b	Cours	2h	10
EF2c	TD	2h	10
Composants de C3			
EF3a	TP	4h	5
EF3b	TP	4h	5
Composants de C4			
EF4a	Cours	1h	10
EF4b	TD	2h	10
EF4c	TP	4h	5
Composants de C5			
EF5a	Cours	2h	10
EF5b	TD	2h	10

Tableau 17. Caractéristiques des éléments de formation spécifiés associés à notre exemple

Afin de rendre notre système de formation en phase avec la réalité, nous considérons que les 10 apprenants ne souhaitent pas souscrire au même service et ne possèdent pas le même profil de compétences à leur entrée. Le Tableau 18 offre une synthèse permettant de voir figurer quelles sont les compétences que notre système devra conférer à chaque apprenant.

élève	Compétences déjà possédées	Compétences terminales	Compétences à acquérir				
			C1	C2	C3	C4	C5
1		C1	x	x	x	x	x
2	C5	C2		x	x	x	
3	C3	C2		x		x	x
4		C4				x	x
5	C4	C1	x	x	x		
6	C3	C1	x	x		x	x
7		C2		x	x	x	x
8	C4	C2		x	x		
9	C3	C1	x	x		x	x
10	C3,C4	C1	x	x			

Tableau 18. Récapitulatif des compétences à acquérir pour chaque élève de notre exemple

La définition de ce problème étant présentée, nous pouvons à présent dénombrer le nombre de variables qui devraient intervenir au sein de ce système :

- $X_{hk} : 4 \times 80 = 320$;
- $X_{gk} : 3 \times 80 = 240$;
- $X_{bk} : 10 \times 80 = 800$;
- $X_{dk} : 2 \times 40 \times 80 = 6\,400$.

On obtient donc 7 760 variables et la taille de ce problème est beaucoup plus raisonnable. Cependant, on peut noter que c'est la discrétisation du temps (introduction des éléments temporels d) qui provoque l'explosion de la combinatoire. Dans le cas de la Licence professionnelle, les variables issues des éléments temporels représentent plus de 97% de l'ensemble des variables ! Dans notre exemple, leur contribution se limite à 82% mais cela représente plus des quatre cinquièmes.

Nous sommes donc à présent en mesure de générer le modèle mathématique associé à cet exemple en utilisant Labview®. La Figure 43 présente l'interface permettant de sélectionner les contraintes que l'on souhaite intégrer au modèle mathématique.

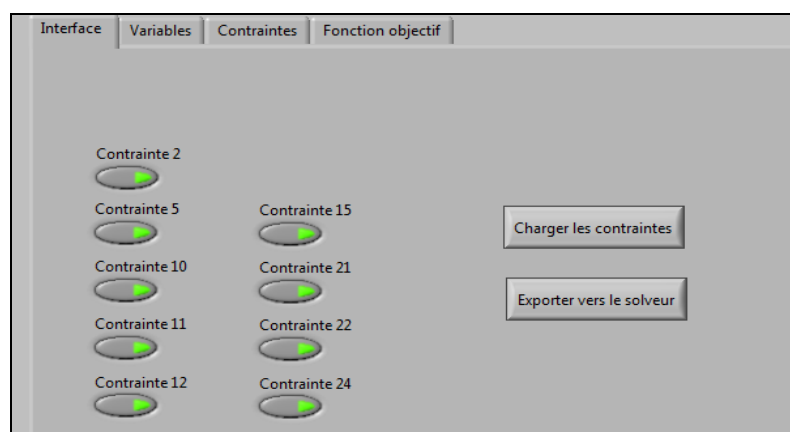


Figure 43. Interface pour la sélection des contraintes

Pour permettre la création automatique de ces contraintes, de la définition des variables et de la fonction objective, cet outil possède un diagramme Labview® que nous présentons sur la Figure 44.

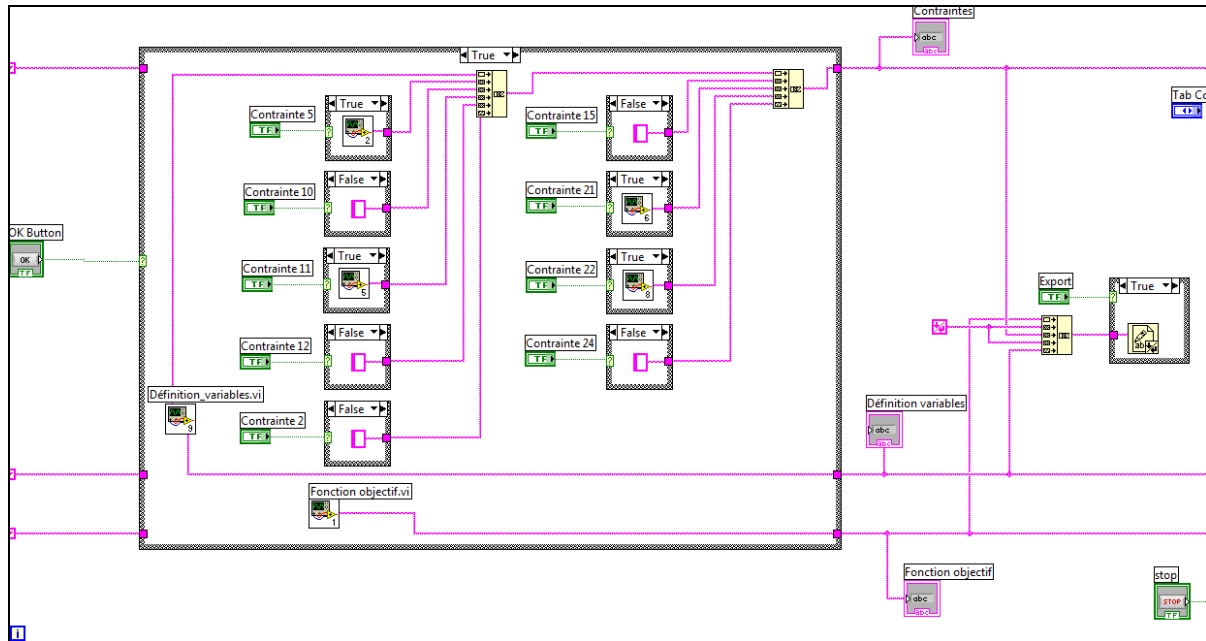


Figure 44. Diagramme pour la création des contraintes, variables et fonction objectif

Ce diagramme nous permet donc de produire par exemple la fonction objective que nous présentons à la Figure 45. Rappelons que l'expression analytique de la fonction économique est :

$$f_{eco} = \text{Min} \left(\sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^K z_{dk} \right) \quad (40)$$

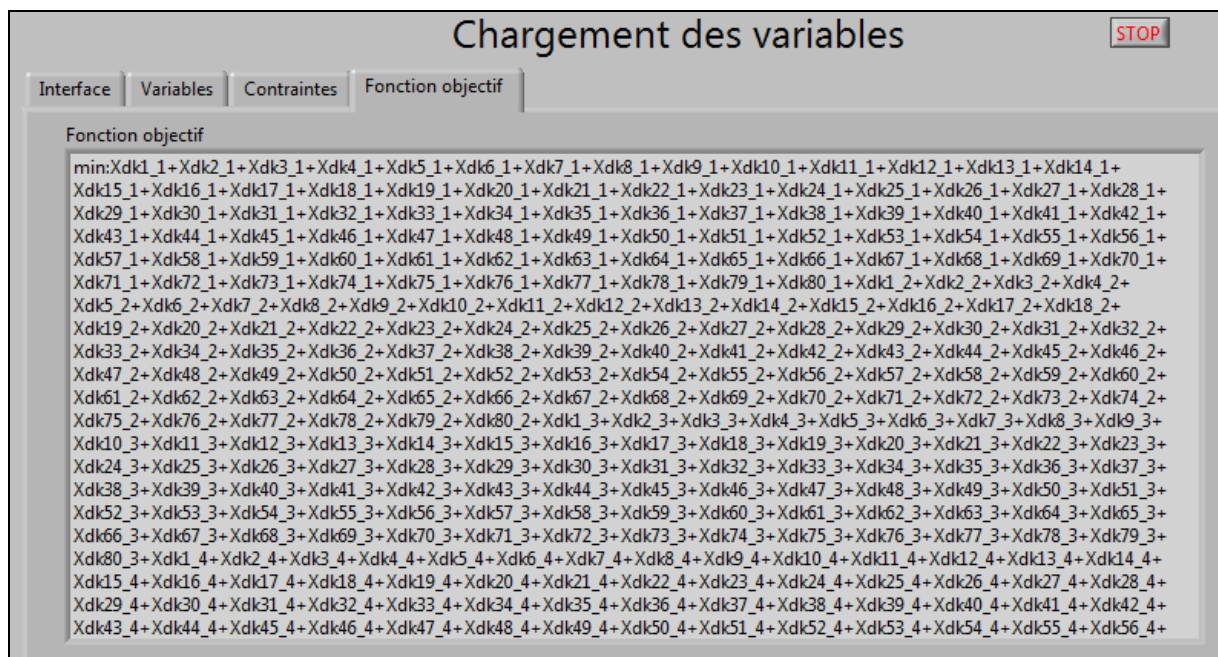


Figure 45. Résultat de la génération de la fonction objectif liée à notre exemple

À titre d'exemple, nous présentons sur la Figure 46 le diagramme permettant la formulation de la contrainte numéro 7.

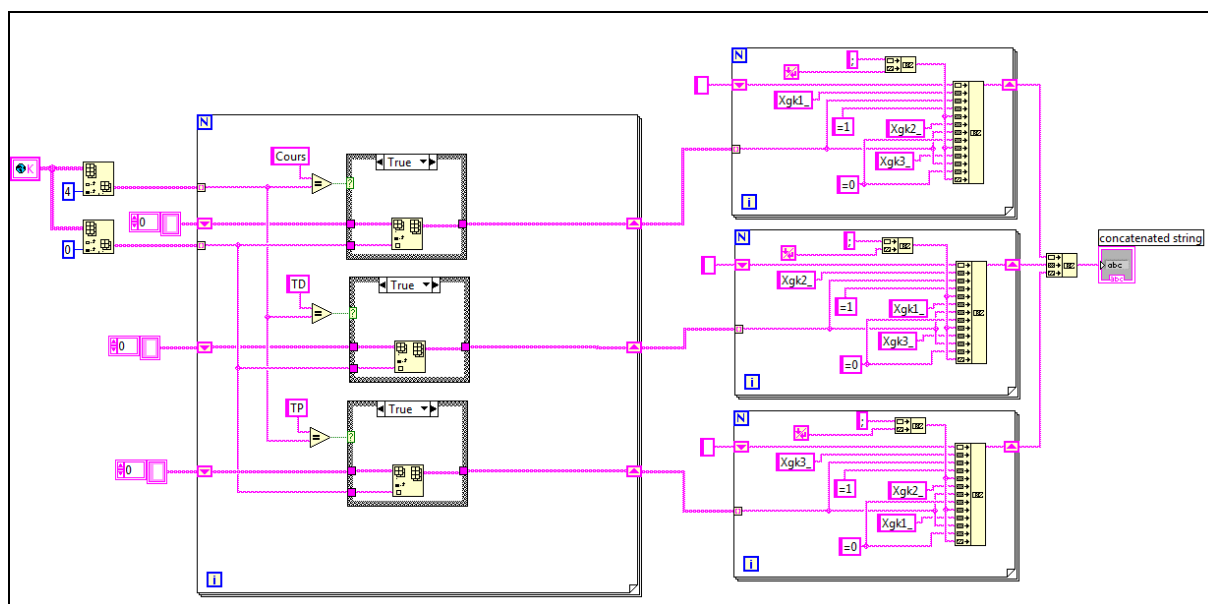


Figure 46. Diagramme pour la création de la contrainte n°7

À l'issue de la génération des contraintes, de la définition des variables et de la fonction objective, nous avons doté notre outil d'une possibilité d'export de l'ensemble du modèle mathématique au format .txt afin qu'il puisse être exploitable par un outil extérieur (de résolution par exemple).

Les méthodes et outils que nous avons développés nous ont donc permis, comme l'illustre cet exemple, de décliner la majeure partie du processus de conception des processus opérationnels d'un système de formation tel que nous l'avons décrit au chapitre 2. Il est important de noter également qu'à chaque étape de conception de nos méthodes et outils, nous avons procédé à d'autres usages applicatifs de ces derniers afin de les valider. Toutefois, nous n'avons pas jugé pertinent de faire figurer ces autres exemples dans ce document.

4. Conclusions et Perspectives

Afin de terminer ce mémoire, nous présentons dans ce dernier chapitre les conclusions de nos travaux ainsi que les perspectives qu'offrent ces derniers. Une première partie établit un bilan de nos travaux en reprenant toutes les étapes de la méthode mise en place. Par la suite, nous indiquons en quoi l'ensemble de nos résultats représente un réel apport scientifique et contribue de façon sensible à l'évolution au sein de notre communauté scientifique du génie industriel. Enfin, dans une dernière partie, nous précisons de quelle manière nos travaux ouvrent la voie à de nombreuses perspectives de développement. En effet, ces derniers constituent une première pierre assurant des fondations solides pour de nombreuses contributions autour des processus du système de formation, qu'ils soient opérationnels ou pas.

A. Bilan de nos travaux

À travers ce mémoire, nous présentons une démarche globale, associée à des outils adaptés, pour l'aide à la conception des processus opérationnels des systèmes de formation. Pour ce faire, nous déclinons l'ensemble du processus de conception en partant de la spécification des caractéristiques des services de formation proposés par le système de formation pour aboutir à la génération du modèle mathématique formalisant l'ordonnancement desdits services. Ainsi, la Figure 47 reprend l'ensemble de notre démarche et illustre le parallèle que nous faisons entre les systèmes de formation et les systèmes de production de biens et de services.

En effet, la démarche que nous présentons reprend la logique de conception des processus opérationnels des systèmes de production de biens et de services à travers les trois jalons nécessaires que sont la conception du produit/service et de sa gamme de fabrication/réalisation, la planification et enfin l'ordonnancement en vue de la production/réalisation desdits produits/services.

À chaque étape de cette démarche, nous avons associé des outils informatiques adaptés à l'environnement et aux contraintes des systèmes de formation. Ces outils ont du être conçus et programmés dans leur grande majorité car répondant à des besoins spécifiques.

En revanche, nos travaux mettent également en évidence la limite de l'analogie entre systèmes de formation et systèmes de production de biens et de services. En effet, lors de l'étape d'ordonnancement, nous montrons qu'il existe une différence fondamentale entre ces deux types de système. Cette différence réside dans le fait que, à la différence de ce que l'on rencontre au sein des systèmes de production, nous ne maîtrisons pas le nombre d'activités de formation qui devront être ordonnancées. En effet, dans le cadre des systèmes de production de biens ou de services, les moyens de production sont parfaitement définis en termes de nombre et de capacités de chacun d'entre eux. Dans le cadre des systèmes de formation, les moyens de production ou formation sont constitués par les différents éléments de formation planifiés dont nous ignorons *a priori* le nombre.

Ce constat a une incidence directe sur nos travaux puisqu'il est un réel obstacle à la proposition d'une méthode de résolution exacte par le biais de la programmation linéaire qui nous aurait permis de proposer une solution optimisant notre fonction économique. Aussi, nos travaux permettent de créer de façon complète le modèle mathématique dans un langage approprié. Ici, nous avons fait le choix d'utiliser le langage de définition LP solve®, car LP solve® est un outil gratuit qui intègre des modules d'exportation vers les différents autres langages de programmation mathématique.

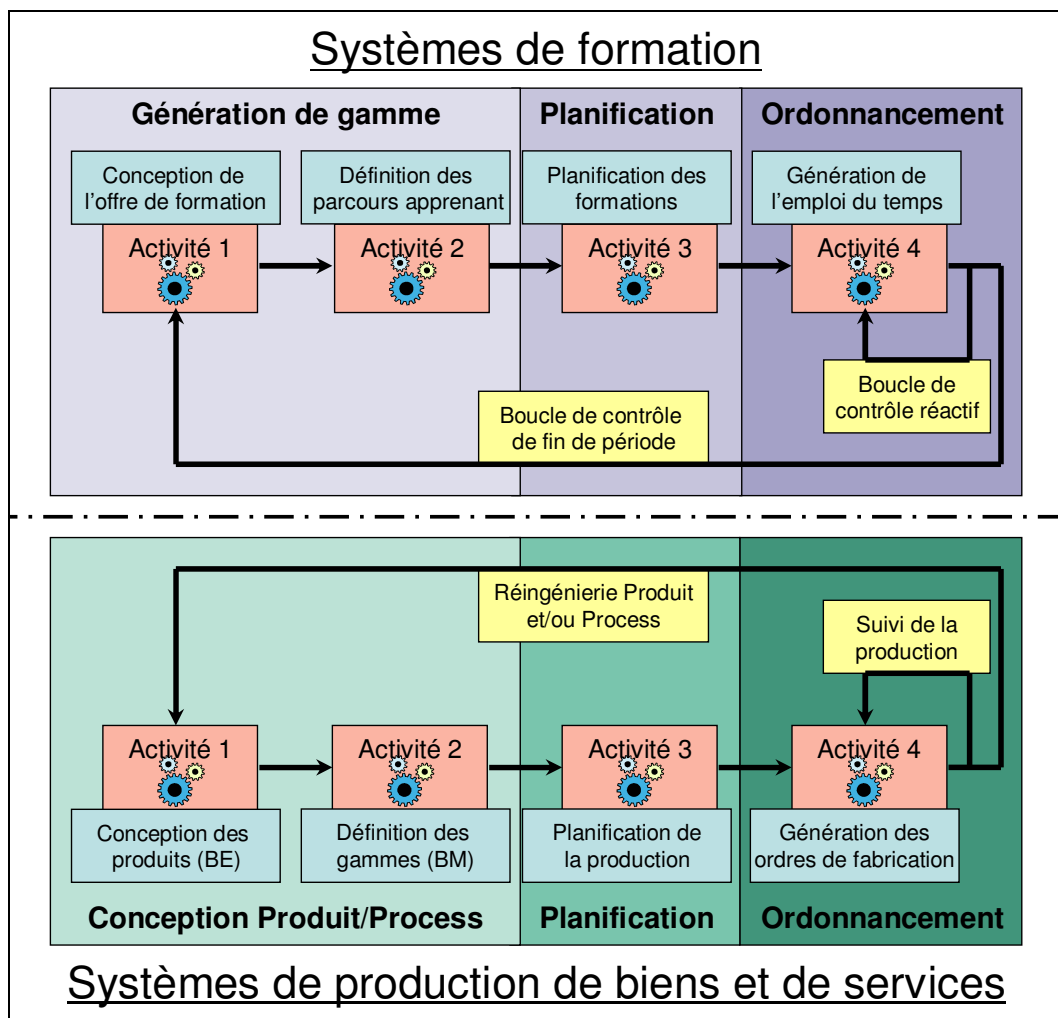


Figure 47. Récapitulatif des travaux et analogie avec les systèmes de production

Par notre contribution, nous apportons donc de la rationalisation au sein des systèmes de formation. Cela permet de s'éloigner d'un fonctionnement « boîte noire » dans lequel la maîtrise des processus de transformation n'est pas acquise. Grâce à la méthode et aux outils proposés, nous sommes en mesure de garantir une véritable réponse cohérente et personnalisée face aux attentes des différents clients du système. La mise en œuvre de nos travaux permettra l'augmentation substantielle du niveau de qualité des formations proposées par les systèmes de formation.

B. Apports scientifiques

Les travaux que nous proposons ici ont pour fondements les premiers concepts de l'ingénierie de formation proposés par Christian CLEMENTZ [CLEMENTZ C., 2000] qui établissait de fortes similitudes entre les systèmes de production de biens et de services et les systèmes de formation. Cette hypothèse a été suivie tout au long du développement de notre contribution pour parvenir à l'étape d'ordonnancement qui nous a permis de mettre en évidence les limites de cette analogie. Ces verrous scientifiques ont donc été explicités et ouvrent la voie sur de nombreuses perspectives.

Cependant, nous disposons à présent d'un modèle de processus proposé à partir de MECI, méthode de modélisation par processus issue des systèmes de production de biens et de services. Nous disposons également d'un modèle particulier UML pour la description des Tâches, des Acteurs, des Compétences et des Activités au sein des

processus opérationnels des systèmes de formation. Là encore, nous nous sommes appuyés sur les travaux relatifs aux systèmes de production de biens et de services et mettons en évidence la possibilité de considérer les systèmes de formation à l'instar des systèmes de production de biens et de services.

Enfin, nous affirmons que, même si nos travaux ne concernent pas le domaine des sciences de l'éducation, leur mise en œuvre nécessite l'intégration des préoccupations spécifiques aux systèmes de formation ou autrement dénommées contraintes pédagogiques. Certaines des contraintes que nous avons proposées font déjà état de cet axe comme par exemple la contrainte n°7 qui impose que tous les éléments de formation d'un même type et d'une même thématique soient assumés par une même ressource humaine.

C. Perspectives de développement

Les perspectives de développement qu'offrent nos travaux sont nombreuses et ce à plusieurs niveaux.

En premier lieu, nous voyons de nombreuses perspectives dans la poursuite directe de nos travaux concernant la partie d'ordonnancement au sein du système de formation. En effet, forts du modèle mathématique, il serait pertinent de s'attarder au développement ou à l'usage de méthodes heuristiques pour la résolution de notre problème en cherchant à obtenir une « bonne » solution suffisamment valorisée par la fonction économique. Des pistes existent assurément vers les algorithmes d'exploration type PSE (Procédures de Séparation Évaluation)

Lors de la constitution des parcours apprenants, nous avons mis en évidence l'importance de maîtriser les référentiels de compétences des entrants. Afin de simplifier le problème que nous avons traité, nous avons choisi de considérer que le référentiel de compétence entrant est équivalent au référentiel de compétences sortant de la formation en amont. Toutefois, cette réflexion n'est valable que si ce système de formation amont a une vocation professionnalisante. Hors, de nombreux systèmes de formation alimentent d'autres systèmes de formation (par exemple en France, l'école primaire alimente le collège). Aussi, il serait intéressant de mener une recherche scientifique sur la « chaîne logistique » dans les systèmes de formation toujours en conservant un parallèle avec les travaux menés pour les systèmes de production de biens et de services.

Les outils que nous avons proposés permettent la spécification des ressources pour la planification au sein du système de formation en général. Hors, dans la pratique, certains systèmes ne disposent pas ou ne veulent pas disposer d'un organe centralisé pour la conception des formations. Par exemple, à l'université, chaque professeur peut être « recruté » par les pilotes de formation et le fonctionnement en est parfois affecté dans la mesure où il n'y a pas de coordination entre ces différents pilotes de formation. Ainsi, il pourrait être intéressant d'intégrer à notre outil la notion de distribution et de partage permettant à plusieurs concepteurs de travailler sur le même « parc » de ressources humaines et techniques.

Enfin, à un niveau plus macroscopique, l'obtention d'une modélisation complète par processus a ouvert la voie à d'autres axes de recherche comme par exemple le pilotage des systèmes de formation ou encore la maintenance au sein de ces systèmes. Au sein de notre équipe de recherche SdP du laboratoire LGIPM, des travaux sont d'ores et déjà en cours sur ces thématiques. Toutefois, les perspectives de développement de travaux scientifiques autour des préoccupations des systèmes de formation sont extrêmement nombreuses car nous avons pu faire le constat que ce domaine reste encore majoritairement inexploré.

5. Bibliographie

- [AFITEP et AFNOR, 2000], «Dictionnaire du Management de Projet français – anglais », AFNOR – AFITEP – France
- [ARTIBA A. *et al*, 2004a], «*Modélisation d'établissement de santé* », 2^{ème} Conférence francophone en Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers, Mons – Belgique
- [ARTIBA A. *et al*, 2004b], «*Réflexion sur le déploiement de la stratégie des établissements de santé* », GISEH04, Mons – Belgique
- [BARTSCH T. *et al*, 2002], «*Generating fair and attractive Football timetables* », in 4th International Conference for Practice and Theory of Automated Timetabling, PATAT 02, Gent – Belgique
- [BAY R., 2006], «*A simulated annealing hyper-heuristic for university course timetabling* », in 6th International Conference for Practice and theory of Automated Timetabling, PATAT 06, Brno – République Tchèque
- [BELLIER S. *et al*, 1999], «*Traité des sciences et techniques de la formation* », Éditions Dunod, Paris – France
- [BISTORIN O. *et al*, 2005], «*Ingénierie et gestion des processus de formation* », 2^{ème} Workshop du GT ECI du pôle STP du GDR MACS, Paris – France
- [BISTORIN O. *et al.*, 2006], «*Modélisation du parcours apprenant dans un système de production de compétences* », 6^{ème} Conférence Francophone de Modélisation et Simulation, MOSIM 06, Rabat – Maroc
- [BRAESCH C., 2002], «*La méthode OLYMPIOS* », Actes de l'École de Printemps sur la Modélisation d'Entreprise, École des Mines d'Albi Carmaux, Albi – France
- [BURKE E. *et al*, 1996], «*A memetic algorithm for university exam timetabling* », in 1st International Conference for Practice and theory of Automated Timetabling, PATAT 95, Edinburgh – Écosse
- [CAMBAZARD H. *et al*, 2004], «*Interactively solving school timetabling problems using extensions of constraint programming* », in 5th International Conference for Practice and theory of Automated Timetabling, PATAT 04, Pittsburgh – USA
- [CARRASCO P. *et al*, 2002], «*Solving real class/teacher timetabling problems using neural networks* », in 4th International Conference for Practice and theory of Automated Timetabling, PATAT 02, Gent – Belgique
- [CASEY S. *et al*, 2002], «*GRASPING the examination scheduling problem*», in 4th International Conference for Practice and Theory of Automated Timetabling, PATAT 02, Gent – Belgique
- [CEREQ, 2003], «*L'enseignement supérieur professionnalisé – un atout pour entrer dans la vie active ?* », BREF n°195, Centre d'Études et de Recherches sur les Qualifications, MEN, Paris – France
- [CHARDON O. et ESTRADÉ M-A., 2007], «*Les métiers en 2015* », Collection « Qualifications & Prospectives », Ministère du travail, des relations sociales et de la solidarité – France
- [CLEMENTZ C., 2000], «*Modélisation des systèmes de production de compétences : apports à l'ingénierie pédagogique* », Thèse de doctorat, Université de METZ – France
- [CODD E., 1970], «*A relational model of data for large shared data banks* », Communications of the ACM, Vol. 13 n° 6, pp. 377-387 – USA

- [COHEN E., 2006], « La professionnalisation de l'enseignement supérieur, une solution à la rareté des ressources en personnel qualifié ? », rencontres économiques d'Aix en Provence 2006, Le cercle des Économistes, Aix en Provence – France
- [CROSS F., 2004], « Émergence et installation de l'innovation scolaire : pertinence de la théorie de la « traduction » », in « Transformer l'école », (p. 59-78), éditions De Boeck-universités, Bruxelles – Belgique
- [CUSTERS N. *et al*, 2004], « *Semantic components for Timetabling* », in 5th International Conference for Practice and Theory for Automated Timetabling, PATAT 04, Pittsburgh – USA
- [DAVID R. et ALLA H., 1992], « *Du Grafcet aux réseaux de Pétri*, 2^{ème} édition revue et augmentée », éditions Hermès, Paris – France
- [DEMEUSE M. et STRAUVEN C., 2006], « *Développer un curriculum d'enseignement ou de formation ; des options politiques au pilotage* », éditions De Boeck Universités, Bruxelles – Belgique
- [ESTEVE M., 2002], « *Curriculum flexibility: critical questions to teachers, schools, teacher educators and researchers* », European Educational Research Association, ECER 2002, September 12th, Lisbonne – Portugal
- [ELEY M., 2006], « *Ant algorithms for the exam timetabling system* », in 6th International Conference for Practice and theory of Automated Timetabling, PATAT 06, Brno – République Tchèque
- [EURYDICE, 2005], « *Chiffres clés de l'éducation en Europe 2005* », Eurydice, publications officielles de la communauté européenne – Europe
- [FOURNIER P-S., 2004], « *Concevoir une formation : réflexion sur une démarche d'aide à l'apprentissage sur le cours de la vie* », PISTES Vol. 6 n°2, UQAM, Montréal – Québec
- [FRETIGNE C., 2004], « *Une formation à l'emploi ?* », collection Savoir et Formation, éditions L'Harmattan, Paris – France
- [GIARD V., 2003], « *Gestion de la production et des flux* », Éditions Economica, Paris – France
- [GIRET J-F., 2005], « *Quand les jeunes s'estiment déclassés* », in *des formations pour quels emplois*, pp279-288, La Découverte collection Recherche – France
- [GT5, 2002], « *Actes de l'Ecole de Printemps sur la Modélisation d'Entreprise* », École des Mines d'Albi Carmaux, Albi – France
- [GT IS, 2004], « *Glossaire de l'Ingénierie Système* », GT IS, <http://www.afis.fr> – France
- [GOTHA, 2006], « *Gestion de projets à contraintes de ressources : approches et méthodes de résolution* », Contributions de la communauté française, Groupe de travail Gotha – RCPSP du GDR RO, France
- [HAAS P. et SCHEDLER G., 1989], « *Stochastic Petri Nets with Timed and Immediate Transitions* », Communication in Statistics., Stochastic Models, Vol. 5, No. 4, pages 563-600, Canada
- [HAMELINE D., 1979], « *Les objectifs pédagogiques en formation initiale et continue* », éditions ESF, Paris – France
- [HARZALLAH M., 2000], « *Modélisation des aspects organisationnels et des compétences pour la réorganisation d'entreprises industrielles* », Thèse de Doctorat de l'Université de Metz en Génie Industriel, Metz – France

- [IGEN, 2006], « Programmes personnalisés de réussite éducative, rapport à Monsieur le ministre de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche », n°2006-048, IGEN, Paris – France
- [IHE, 2006], « *Top 500 World University* », Institute for Higher Education, Shanghai Jiao Tong University – Chine
- [JACOBSEN F. *et al*, 2006], « *Timetabling at German secondary schools : Tabu search versus constraint programming* », in 6th International Conference for Practice and theory of Automated Timetabling, PATAT 06, Brno – République Tchèque
- [JOHANSSON H. *et.al*, 1993], « *Business Process Reengineering: BreakPoint Strategies for Market Dominance* », éditions John Wiley & Sons – USA
- [JONNAERT P., 2002], « *Compétences et socioconstructivisme : un cadre théorique* », Editions De Boeck universités, Bruxelles – Belgique
- [KAPLAN R. et NORTON D., 2003], « *Le tableau de bord prospectif* », Les éditions d'organisation – France
- [KINGSTON J., 2004], « *A tiling algorithm for high school timetabling* », in 5th International Conference for Practice and theory of Automated Timetabling, PATAT 04, Pittsburgh – USA
- [LE BOTERF G., 1997], « *L'ingénierie des compétences* », Éditions d'Organisation, Paris – France
- [LE BOTERF G., 1999], « *Les défis posés à l'ingénierie de formation et à la production des expertises collectives. Quelles évolutions prendre en compte ? Quelles conséquences pratiques ?* », Journées d'étude « *Ingénierie des dispositifs de formation à l'international* », 24-25 novembre 1999, Montpellier – France
- [LE BOTERF G., 2006a], « *Construire les compétences individuelles et collectives : Agir et réussir avec compétence* », 4^{ème} édition, Éditions d'Organisation, Paris – France
- [LE BOTERF G., 2006b], « *Ingénierie et évaluation des compétences* », 5^{ème} édition, Éditions d'Organisation, Paris – France
- [LEMISTRE P., 2007], « *Diplômes et emplois occupés par les jeunes : une correspondance à revoir ?* », note LIRHE n°438 – France
- [LE MOIGNE J-L., 1994], « *La théorie du système général – Théorie de la Modélisation* », Collection Classiques du réseau intelligence de la complexité, PUF – France
- [LISSANDRE M., 1990], « *Maîtriser SADT* », Librairie Colin, Paris – France
- [MAUGUIERE P. *et al*, 2005], « *New single machine and job-shop scheduling problems with availability constraints* », Journal of Scheduling, vol. 8, no 3, pp. 211-231, Tours – France
- [MEN, 2006a], « *Repères et références statistiques – édition 2006* », Ministère de l'Éducation Nationale – France
- [MEN, 2006b], « *Enquête sur les TICE dans les établissements publics des premier et second degrés* », Ministère de l'Éducation Nationale – France
- [MEN, 2006c], « *Notes d'Information n°29 – 2006, Que sont devenus les bacheliers 2002 trois ans après l'obtention du bac ?* », Ministère de l'Éducation Nationale – France
- [MEN, 2007], « *Notes d'Information n°5 – 2007* », Ministère de l'Éducation Nationale – France
- [MERLOT L. *et al*, 2002], « *A hybrid algorithm for the examination timetabling problem* », in 4th International Conference for Practice and Theory of Automated Timetabling, PATAT 02, Gent – Belgique

- [MEURET D., 2007], « Gouverner l'école, une comparaison France/États-Unis », éditions PUF – France
- [MHAMED A., 2002a], « *La méthode CIMOSA* », Actes de l'École de Printemps sur la Modélisation d'Entreprise, École des Mines d'Albi Carmaux, Albi – France
- [MHAMED A., 2002b], « *La méthode ACNOS* », Actes de l'École de Printemps sur la Modélisation d'Entreprise, École des Mines d'Albi Carmaux, Albi – France
- [MILED M., 2005], « *Un cadre conceptuel pour l'élaboration d'un curriculum selon l'approche par les compétences* », La refonte de la pédagogie en Algérie – défis et enjeux d'une société en mutation, UNESCO-ONPS, pp 125-136, Alger – Algérie
- [MOREAU G., 2002], « *Les patrons, l'État, et la formation des jeunes* », éditions La Dispute, Paris – France
- [NAUZE-FICHET E. et TOMASINI M., 2006], « *Parcours des jeunes à la sortie du système éducatif et déclassement salarial* », Économie et Statistiques, n°388-389 pp57-83.
- [OCDE, 1999], « Nomenclature des systèmes d'éducation, Guide d'utilisation de la CITE 1997 », OCDE – France
- [OCDE, 2004], « Résultats de l'enquête PISA 2003, les chiffres clés », OCDE – France
- [OCDE, 2006], « Regards sur l'Éducation 2006 », OCDE – France
- [OMG, 2007], « *Unified Modeling Language, specifications v2.1.1* », Object Management Group, International organisation
- [PADILLA P. et al, 2001], « *Les systèmes de production de compétences : approche processus* », Revue Internationale d'Ingénierie des Systèmes de Production Mécanique n°5, France
- [PERNIZA R., 2006], « *Solving the university timetabling problem with optimized enrolment of students by a parallel self-adaptive genetic algorithm* », in 6th International Conference for Practice and theory of Automated Timetabling, PATAT 06, Brno – République Tchèque
- [PIERREVAL H., 1994], « *Les méthodes d'analyse et de conception de systèmes de production* », éditions Hermès, Paris – France
- [PITTE J-R., 2006], « *Jeunes, on vous ment ! : Reconstruire l'Université* », éditions Fayard – France
- [PLF, 2007], « *Projet de Loi de Finances 2007* », Ministère de l'Économie et des Finances – France
- [POURCEL C., 2005], « Ingénierie des systèmes de production d'objets et ingénierie des systèmes de production de services : même approche ? L'exemple des systèmes de production de connaissances et de compétences », CIMQUSEF'05, Casablanca – Maroc
- [POURCEL C. et GOURC D., 2005], « *Modélisation d'entreprise par les processus : activités, organisation & applications* », Cépaduès édition, Toulouse – France
- [PROST A., 2000], « *Réformes possibles et impossibles* », Conférence à la septième biennale de l'éducation, Sorbonne – France
- [ROEGIERS X., 2006], « Approche par compétences dans l'enseignement supérieur et cadre européen de qualifications : opportunités, enjeux et dérives », Colloque « La logique des compétences : chance ou danger ? Vers un cadre de qualification dans l'enseignement supérieur », 17 octobre 2006, Bruxelles – Belgique
- [ROZI MALIM M. et al, 2006], « *Artificial immune algorithms for university timetabling* », in 6th International Conference for Practice and theory of Automated Timetabling, PATAT 06, Brno – République Tchèque

- [VALLESPER B. et DOUGMEINTS G., 2002], « *La méthode GRAI* », Actes de l'École de Printemps sur la Modélisation d'Entreprise, École des Mines d'Albi Carmaux, Albi – France
- [VANDEN BERGHE G., 2002], « *An Advanced Model and Novel Meta-Heuristic Solution Methods to Personnel Scheduling in Healthcare* », PhD thesis, School of Computer Science and Information Technology, University of Nottingham – Angleterre
- [VAUDELIN J-P. et DEVISE O., 2004], « L'intégration des compétences en vue de l'amélioration de la performance industrielle d'une unité de production », 2^{ème} colloque du groupe de travail C2EI, 1-2 décembre 2004, Nancy – France
- [VINCENS J., 2006], « Universités : un diplôme et un emploi pour chaque étudiant ? », note LIRHE n°437 – France
- [WREN A., 1996], « *Scheduling, Timetabling and rostering – a special relationship?* », selected papers of the 3rd international conference on Practice and theory of automated Timetabling, springer LNCS 1153, 16-75, Edinburgh – Écosse

Liste des figures

Figure 1. Éléments moteurs de la croissance du PIB (1994-2004)	12
Figure 2. Dépenses au titre des établissements d'enseignement en pourcentage du PIB (1995-2003).....	15
Figure 3. Pourcentage d'ordinateurs accessibles aux élèves/étudiants, enseignants, administratifs, connectés	17
Figure 4. Répartition des sortants de formation initiale selon leur diplôme le plus élevé	19
Figure 5. Évolution de la dépense par élève et par niveau d'enseignement	21
Figure 6. Évolution démographique attendue pour 2015 pour les jeunes de 5 à 19 ans (2005)	31
Figure 7. Rapport entre le salaire moyen enseignant et le PIB par habitant (2004).....	31
Figure 8. Espérance de scolarisation et de formation continue pour un enfant âgé de 5 ans (2004)	33
Figure 9. Distinction accès libre - accès restreint dans l'enseignement supérieur.....	34
Figure 10. Positionnement de l'ingénierie des exigences au cœur de processus de conception	37
Figure 11. Stratégie et facteurs clés de succès des systèmes de formation	41
Figure 12. Démarche globale d'ingénierie des processus opérationnels du système de formation	50
Figure 13. Vue externe du système de formation.....	51
Figure 14. Méta-modèle fonctionnel MECI.....	54
Figure 15. Vue interne de l'unité organisationnelle MECI.....	54
Figure 16. Vue des processus et des liens entre ceux-ci du système de formation selon MECI	55
Figure 17. Granularité des Tâches dans un système de formation.....	57
Figure 18. Modélisation UML des acteurs-Ressources du système de formation	58
Figure 19. Intégration des compétences et aptitudes des ressources du système de formation.....	58
Figure 20. Modélisation UML des activités des processus opérationnels du système de formation	59
Figure 21. Identification des différents catalogues de services associés au système de formation ENIM.....	61
Figure 22. Spécification des référentiels de compétences intrants et extrants	64
Figure 23. Description des pré-requis directs entre compétences	65
Figure 24. Constitution de la gamme de formation à partir des référentiels métiers et apprenant	66
Figure 25. Algorithme de définition des compétences pré-requises par rapport aux compétences terminales d'un référentiel	67
Figure 26. Réseau de Petri unitaire associé au processus d'acquisition d'une compétence.....	70
Figure 27. Représentation graphique sous VisualObject du réseau de Pétri associé à notre exemple	72
Figure 28. Renseignement des compétences et précédences dans la base de données	75
Figure 29. Simulateur de parcours apprenant utilisant les Réseaux de Petri	75
Figure 30. Modélisation UML pour les éléments de formation spécifiés	77
Figure 31. Menu général de l'interface associée à l'outil de bases de données pour les systèmes de formation	79
Figure 32. Interface permettant la spécification de l'ensemble des éléments de formation spécifiés	80
Figure 33. Interface permettant la vérification des volumes horaires spécifiés	82
Figure 34. Face avant de l'Interface pour la sélection des contraintes à appliquer au modèle	99

Figure 35. Diagramme pour la création automatisée de la contrainte n°10	99
Figure 36. Démarche globale associée aux outils	100
Figure 37. Formulaire pour la définition des éléments de formation spécifiés.....	103
Figure 38. Formulaire pour la définition des actions de formation.....	103
Figure 39. Interface pour la vérification des volumes horaires lors de la planification.....	105
Figure 40. Présentation de l'interface pour la vérification des capacités ressources	105
Figure 41. Diagramme correspondant à la vérification de la cohérence horaire.....	106
Figure 42. Description des compétences associées à notre exemple	107
Figure 43. Interface pour la sélection des contraintes	108
Figure 44. Diagramme pour la création des contraintes, variables et fonction objectif.....	109
Figure 45. Résultat de la génération de la fonction objectif liée à notre exemple	109
Figure 46. Diagramme pour la création de la contrainte n°7	110
Figure 47. Récapitulatif des travaux et analogie avec les systèmes de production.....	112

Liste des tableaux

Tableau 1. Taux d'emploi selon le niveau de formation (2004).....	12
Tableau 2. Taux de Rendement Interne social lié à l'obtention d'un diplôme scolaire (2003)	13
Tableau 3. Répartition des dépenses publiques/privées pour l'éducation scolaire en pourcentage du PIB	15
Tableau 4. Dépenses au titre des établissements d'enseignement par catégorie de ressources (2003)	17
Tableau 5. Répartition des compétences entre l'État et les collectivités territoriales	18
Tableau 6. Évolution de la dépense d'éducation par financeurs finals (en millions d'euros)... ..	20
Tableau 7. Évolution de la dépense d'éducation par niveaux d'enseignement (en millions d'euros)	21
Tableau 8. Répartition des effectifs enseignants et taux d'encadrement 2006	22
Tableau 9. Répartition des personnels administratifs, techniques et d'encadrement 2006	23
Tableau 10. Actifs immobiliers du système éducatif français 2006	24
Tableau 11. Déclassement par catégorie d'emploi en fonction du diplôme possédé (2006) [LEMISTRE P., 2007]	25
Tableau 12. Volumes horaires d'instruction prévue entre 7 et 15 ans dans les pays de l'OCDE (2004)	28
Tableau 13. Origine publique privée des ressources financières des systèmes de formation (2003)	30
Tableau 14. Typologie des projets d'ingénierie adaptée aux systèmes de formation.....	39
Tableau 15. Matrice d'incidence du RdP associé au processus d'acquisition d'une compétence	71
Tableau 16. Classement des contraintes associées au modèle mathématique.....	87
Tableau 17. Caractéristiques des éléments de formation spécifiés associés à notre exemple	107
Tableau 18. Récapitulatif des compétences à acquérir pour chaque élève de notre exemple	108

Annexes

Annexe 1. Référentiels CITE 1997 pour la formation scolaire.....	126
Annexe 2. Structure du système de formation scolaire français	128
Annexe 3. Modèle UML pour les processus opérationnels du système de formation	129
Annexe 4. Extrait de l'export de cent simulations du parcours de formation IUT Génie mécanique dans un logiciel d'analyse numérique (Excel)	130
Annexe 5. Catalogue de variables associées aux relations issues des entités de notre modèle	131
Annexe 6. Catalogue de variables associées aux relations issues des associations du modèle	132
Annexe 7. Guide de lecture de l'expression des contraintes.....	133

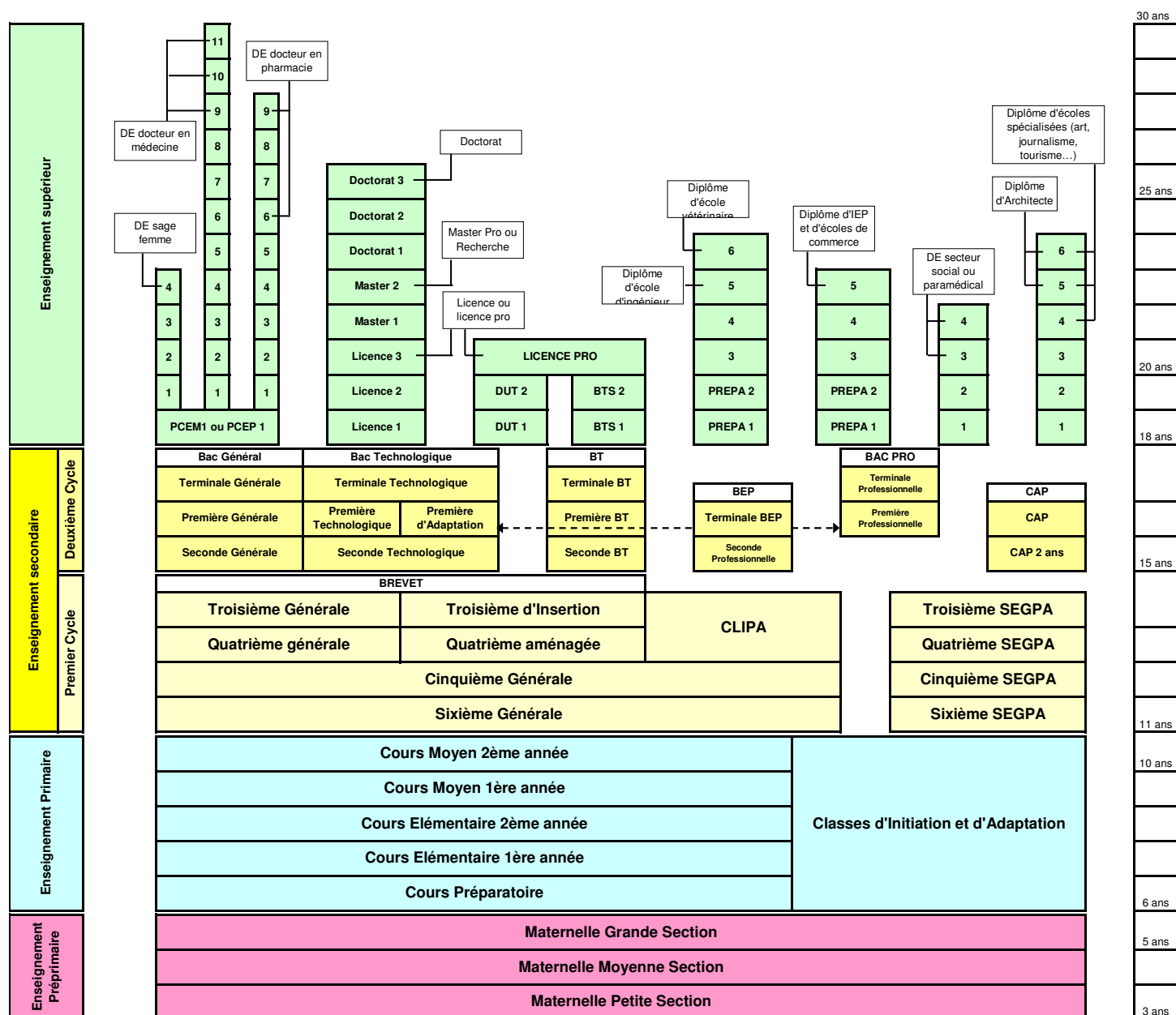
Annexe 1. Référentiels CITE 1997 pour la formation scolaire

	Classification CITE	Description
Enseignement pré- primaire	CITE 0	L'enseignement pré-primaire, ou préscolaire, est définie comme le stade initial de l'enseignement organisé, qui sert principalement à familiariser les très jeunes enfants avec un environnement de type scolaire, c'est-à-dire à établir des liens entre le milieu familial et le cadre scolaire. En principe, les programmes du niveau 0 de la CITE se déroulent dans un site spécifique ou en milieu scolaire, sont conçus pour répondre aux besoins d'éducation et favoriser le développement des enfants âgés de trois ans au moins et doivent être dispensés par du personnel formé à cet effet (qualifié).
Enseignement Primaire	CITE 1	L'enseignement primaire commence en général à l'âge de 5, 6 ou 7 ans et dure entre quatre et six années (six années est la durée la plus fréquente dans les pays de l'OCDE). L'entrée dans l'enseignement primaire n'exige en principe aucune formation préalable dans l'enseignement institutionnel, bien qu'il soit de plus en plus courant que les enfants fréquentent l'enseignement pré-primaire avant d'accéder à ce niveau. L'enseignement primaire se distingue généralement de l'éducation pré-primaire par le fait qu'il marque le début des études systématiques caractéristiques de ce niveau, à savoir la lecture, l'écriture et les mathématiques. Il est fréquent toutefois que les enfants commencent à acquérir des compétences de base en lecture et en calcul dès l'enseignement préprimaire.
Enseignement secondaire	CITE 2	Pour l'essentiel, le premier cycle du secondaire prolonge le programme fondamental de l'enseignement primaire, mais il est généralement dispensé sur un mode plus thématique, par des enseignants plus spécialisés qui donnent cours dans leur domaine. Le premier cycle de l'enseignement secondaire peut avoir une finalité « terminale » (c'est-à-dire préparer les élèves à entrer directement dans la vie active) et/ou « préparatoire » (c'est-à-dire préparer les élèves à suivre le deuxième cycle de l'enseignement secondaire). Ce niveau d'enseignement compte généralement deux à six années d'études (la durée la plus fréquente est de trois années dans les pays de l'OCDE).
	CITE 3	Le deuxième cycle de l'enseignement secondaire correspond à la dernière étape de l'enseignement secondaire dans la plupart des pays de l'OCDE. Le cloisonnement des matières est généralement plus prononcé à ce niveau qu'au niveau 2 de la CITE. De même, les enseignants doivent posséder des qualifications plus poussées et plus spécialisées qu'au niveau 2 de la CITE. Les élèves ont généralement 15 ou 16 ans lorsqu'ils accèdent à ce niveau d'enseignement. La durée la plus fréquente des programmes de niveau 3 de la CITE varie considérablement dans et entre les pays. Elle est comprise entre deux et cinq ans. Le deuxième cycle de l'enseignement secondaire peut avoir une finalité « terminale » (c'est-à-dire préparer les élèves à entrer directement dans la vie active) et/ou « préparatoire » (c'est-à-dire préparer les élèves à entamer des études tertiaires). Les formations du deuxième cycle de l'enseignement secondaire peuvent être réparties en trois catégories (filières générale, préprofessionnelles et professionnelle) en fonction de leur orientation, c'est-à-dire selon qu'elles visent plus ou moins des professions ou des secteurs particuliers et permettent d'acquérir des qualifications utiles sur le marché du travail.

	Classification CITE	Description
Enseignement Postsecondaire	CITE 4	L'enseignement postsecondaire non tertiaire englobe des programmes qui se trouvent, dans une optique internationale, à la limite entre le deuxième cycle du secondaire et le postsecondaire, même si d'un point de vue national, il est clairement possible de les rattacher soit au deuxième cycle du secondaire, soit au postsecondaire. Certes, ces programmes ne sont peut-être pas d'un niveau beaucoup plus poussé que ceux dispensés dans le deuxième cycle du secondaire, mais ils servent à enrichir les connaissances des participants qui ont déjà obtenu un diplôme à ce niveau. Les élèves sont en général plus âgés que ceux qui fréquentent le deuxième cycle de l'enseignement secondaire.
Enseignement Tertiaire ou Supérieur	CITE 5A	Les formations tertiaires de type A ont des contenus très largement théoriques et doivent permettre d'acquérir des compétences suffisantes pour accéder à des programmes de recherche de haut niveau et à des professions exigeant un haut niveau de compétences, telles que la médecine, la dentisterie ou l'architecture. La durée de ces formations est théoriquement d'au moins trois ans en équivalent temps plein mais elle est généralement de quatre ans ou plus. Ces formations ne sont pas exclusivement dispensées dans des universités. Des formations dites « universitaires » dans différents pays ne satisfont pas toutes aux critères à respecter pour être classées dans les formations tertiaires de type A. L'enseignement tertiaire de type A comprend aussi les seconds diplômes, tels que la maîtrise (<i>Master</i>) aux États-Unis. Les formations conduisant à un premier ou second diplôme sont classées selon la durée théorique cumulée des études, c'est-à-dire en fonction du temps nécessaire à l'obtention d'un diplôme tertiaire.
	CITE 5B	Les formations tertiaires de type B sont en général plus courtes que celles de type A et sont axées sur l'acquisition de qualifications pratiques, techniques et professionnelles en vue d'une entrée directe sur le marché du travail, bien que les différents programmes puissent comprendre certains enseignements théoriques de base. Leur durée est au minimum de deux ans en équivalent temps plein.
	CITE 6	Les programmes de recherche de haut niveau désignent les formations de niveau tertiaire qui sont sanctionnées directement par la délivrance d'un diplôme de recherche de haut niveau, un doctorat par exemple. La durée théorique de ces formations est de trois ans à temps plein dans la plupart des pays (soit une durée cumulée totale de sept ans au moins en équivalent temps plein dans l'enseignement tertiaire), mais la durée effective de ces études est généralement plus longue. Ces programmes sont consacrés à des études approfondies et à des travaux de recherche originaux.

Source OCDE – Guide d'utilisation de la CITE 1997 (Paris, 1999)

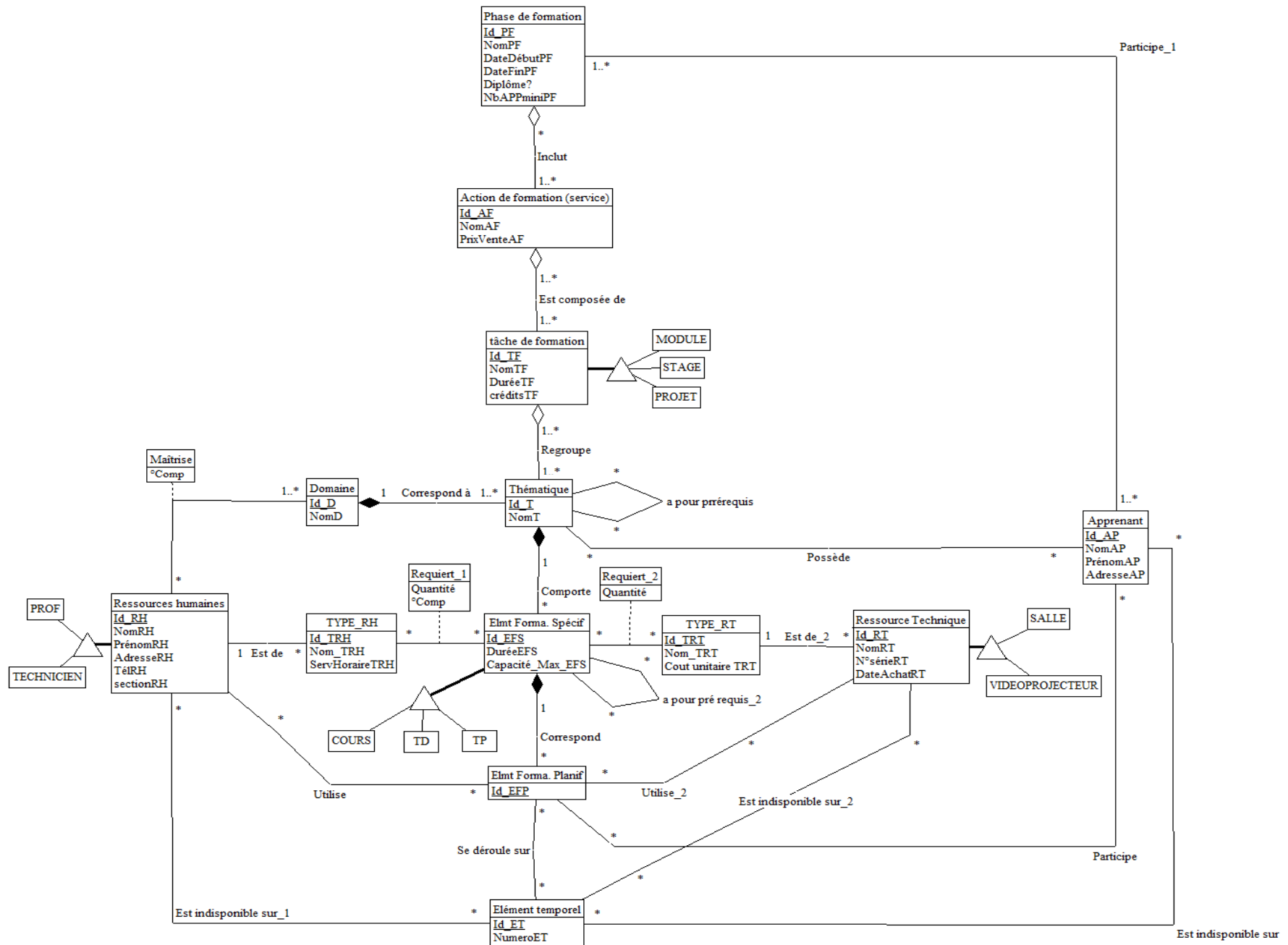
Annexe 2. Structure du système de formation scolaire français



Source MEN 2007

- BEP : Brevet d'Études Professionnelles
 BT : Brevet de Technicien
 BTS : Brevet de Technicien Supérieur
 CAP : Certificat d'Aptitude Professionnelle
 CLIPA : Classe d'Initiation Pré professionnelle à l'Apprentissage
 DUT : Diplôme Universitaire Technologique
 PCEM : Premier Cycle des Études Médicales
 PCEP : Premier Cycle des Études Pharmaceutiques
 PREPA = CPGE : Classes Préparatoires aux Grandes Écoles
 SEGPA : Section d'Enseignement Général Professionnel et Adapté

Annexe 3. Modèle UML pour les processus opérationnels du système de formation



Annexe 4. Extrait de l'export de cent simulations du parcours de formation IUT Génie mécanique dans un logiciel d'analyse numérique (Excel)

RESULTATS SIMULATION IUT															
Simulation 1		Simulation 2		Simulation 3		Simulation 4		Simulation 5		Simulation 6		Simulation 7		Simulation 8	
TRANSITION	TEMPS(h)	TRANSITION	TEMPS(h)	TRANSITION	TEMPS(h)	TRANSITION	TEMPS(h)	TRANSITION	TEMPS(h)	TRANSITION	TEMPS(h)	TRANSITION	TEMPS(h)	TRANSITION	TEMPS(h)
T-F132am	0	T-F134am	0	T-F127am	0	T-F131am	0	T-F111am	0	T-F116am	0	T-F131am	0	T-F115am	0
T-F132av	30	T-F134av	30	T-F127av	15	T-F131av	30	T-F111av	30	T-F116av	30	T-F131av	30	T-F115av	15
T-F113am	0	T-F113am	0	T-F114am	0	T-F123.1am	0	T-F125am	0	T-F132am	0	T-F135am	0	T-F121am	0
T-F113av	30	T-F113av	30	T-F114av	30	T-F123.1av	15	T-F125av	30	T-F132av	30	T-F135av	30	T-F121av	30
T-F112am	0	T-F123.1am	0	T-F116am	0	T-F115am	0	T-F124am	0	T-F317am	0	T-F125am	0	T-F114am	0
T-F112av	31	T-F123.1av	15	T-F116av	30	T-F115av	15	T-F124av	15	T-F317av	15	T-F125av	30	T-F114av	30
T-F125am	0	T-F111am	0	T-F132am	0	T-F311am	0	T-F128am	0	T-F232am	0	T-F234am	0	T-F131am	0
T-F125av	30	T-F111av	30	T-F132av	30	T-F311av	30	T-F128av	15	T-F232av	30	T-F234av	15	T-F131av	30
T-F341am	0	T-F112am	0	T-F227am	0	T-F128am	0	T-F134am	0	T-F128am	0	T-F341am	0	T-F127am	0
T-F341av	90	T-F112av	31	T-F227av	30	T-F128av	15	T-F134av	30	T-F128av	15	T-F341av	90	T-F127av	15
T-F234am	0	T-F341am	0	T-F232am	0	T-F114am	0	T-F127am	0	T-F234am	0	T-F112am	0	T-F125am	0
T-F234av	15	T-F341av	90	T-F232av	30	T-F114av	30	T-F127av	15	T-F234av	15	T-F112av	31	T-F125av	30
T-F311am	0	T-F132am	0	T-F112am	0	T-F112am	0	T-F211am	0	T-F114am	0	T-F134am	0	T-F128am	0
T-F311av	30	T-F132av	30	T-F112av	31	T-F112av	31	T-F211av	30	T-F114av	30	T-F134av	30	T-F128av	15
T-F116am	0	T-F234am	0	T-F113am	0	T-F124am	0	T-F326Aam	0	T-F332am	0	T-F311am	0	T-F135am	0
T-F116av	30	T-F234av	15	T-F113av	30	T-F124av	15	T-F326Aav	15	T-F332av	30	T-F311av	30	T-F135av	30
T-F214am	0	T-F311am	0	T-F234am	0	T-F127am	0	T-F126am	0	T-F341am	0	T-F116am	0	T-F134am	0
T-F214av	30	T-F311av	30	T-F234av	15	T-F127av	15	T-F126av	15	T-F341av	90	T-F116av	30	T-F134av	30
T-F135am	0	T-F128am	0	T-F126am	0	T-F113am	0	T-F115am	0	T-F311am	0	T-F141am	0	T-F216am	0
T-F135av	30	T-F128av	15	T-F126av	15	T-F113av	30	T-F115av	15	T-F311av	30	T-F141av	60	T-F216av	30
T-F131am	0	T-F127am	0	T-F125am	0	T-F341am	0	T-F121am	0	T-F111am	0	T-F111am	0	T-F231am	0
T-F131av	30	T-F127av	15	T-F125av	30	T-F341av	90	T-F121av	30	T-F111av	30	T-F111av	30	T-F231av	30
T-F123.1am	0	T-F124am	0	T-F341am	0	T-F227am	0	T-F132am	0	T-F135am	0	T-F132am	0	T-F331am	0
T-F123.1av	15	T-F124av	15	T-F341av	90	T-F227av	30	T-F132av	30	T-F135av	30	T-F132av	30	T-F331av	30
T-F123.2am	0	T-F214am	0	T-F121am	0	T-F134am	0	T-F114am	0	T-F124am	0	T-F231am	0	T-F326Aam	0
T-F123.2av	15	T-F214av	30	T-F121av	30	T-F134av	30	T-F114av	30	T-F124av	15	T-F231av	30	T-F326Aav	15
T-F124am	0	T-F227am	0	T-F128am	0	T-F126am	0	T-F212am	0	T-F125am	0	T-F115am	0	T-F223am	0
T-F124av	15	T-F227av	30	T-F128av	15	T-F126av	15	T-F212av	30	T-F125av	30	T-F115av	15	T-F223av	30
T-F134am	0	T-F232am	0	T-F123.1am	0	T-F132am	0	T-F234am	0	T-F127am	0	T-F124am	0	T-F116am	0
T-F134av	30	T-F232av	30	T-F123.1av	15	T-F132av	30	T-F234av	15	T-F127av	15	T-F124av	15	T-F116av	30
T-F232am	0	T-F211am	0	T-F214am	0	T-F226am	0	T-F113am	0	T-F134am	0	T-F114am	0	T-F112am	0
T-F232av	30	T-F211av	30	T-F214av	30	T-F226av	30	T-F113av	30	T-F134av	30	T-F114av	30	T-F112av	31
T-F111am	0	T-F228am	0	T-F228am	0	T-F441am	0	T-F227am	0	T-F326Aam	0	T-F127am	0	T-F431Aam	0
T-F111av	30	T-F228av	30	T-F228av	30	T-F441av	90	T-F227av	30	T-F326Aav	15	T-F127av	15	T-F431Aav	15
T-F141am	0	T-F441am	0	T-F123.2am	0	T-F232am	0	T-F131am	0	T-F112am	0	T-F223am	0	T-F141am	0
T-F141av	60	T-F441av	90	T-F123.2av	15	T-F232av	30	T-F131av	30	T-F112av	31	T-F223av	30	T-F141av	60
T-F126am	0	T-F326Aam	0	T-F441am	0	T-F141am	0	T-F214am	0	T-F227am	0	T-F326Aam	0	T-F113am	0
T-F126av	15	T-F326Aav	15	T-F441av	90	T-F141av	60	T-F214av	30	T-F227av	30	T-F326Aav	15	T-F113av	30
T-F211am	0	T-F131am	0	T-F1216am	0	T-F123.2am	0	T-F123.1am	0	T-F326Bam	0	T-F126am	0	T-F217am	0
T-F211av	30	T-F131av	30	T-F216av	30	T-F123.2av	15	T-F123.1av	15	T-F326Bav	15	T-F126av	15	T-F217av	15
T-F224am	0	T-F115am	0	T-F115am	0	T-F121am	0	T-F215am	0	T-F115am	0	T-F123.1am	0	T-F317am	0
T-F224av	30	T-F115av	15	T-F115av	15	T-F121av	30	T-F215av	30	T-F115av	15	T-F123.1av	15	T-F317av	15
T-F128am	0	T-F212am	0	T-F122am	0	T-F234am	0	T-F225am	0	T-F223am	0	T-F232am	0	T-F431Bam	0
T-F128av	15	T-F212av	30	T-F122av	30	T-F234av	15	T-F225av	30	T-F223av	30	T-F232av	30	T-F431Bav	15
T-F114am	0	T-F114am	0	T-F111am	0	T-F216am	0	T-F232am	0	T-F224am	0	T-F326Bam	0	T-F311am	0

Annexe 5. Catalogue de variables associées aux relations issues des entités de notre modèle

Phase de formation A		
	Identifiant de la phase a	Ai _a
	Nom de la phase a	An _a
	Date de début de la phase a	As _a
	Date de fin de la phase a	Af _a
	Accès à un diplôme par la phase a	Ad _a
	Nombre minimum d'apprenants pour la phase a	Aa _a
Apprenant B		
	Identifiant de l'apprenant b	Bi _b
	Nom de l'apprenant b	Bn _b
	Prénom de l'apprenant b	Bp _b
	Adresse de l'apprenant b	Ba _b
Action de formation C		
	Identifiant de l'action de formation c	Ci _c
	Nom de l'action de formation c	Cn _c
	Prix de l'action de formation c	Cp _c
Élément temporel D		
	Identifiant de l'élément temporel d	Di _d
	Indice temporel de l'élément temporel d	Dd _d
Tâche de formation E		
	Identifiant de la tâche de formation e	Ei _e
	Nom de la tâche de formation e	En _e
	Nb crédits de la tâche de formation e	Ec _e
	Durée en heure de la tâche de formation e	Ed _e
	Type de la tâche de formation e	Et _e
Thématique F		
	Identifiant de la thématique f	Fi _f
	Nom de la thématique f	Fn _f
	Domaine de la thématique f	Fd _f
Ressource technique G		
	Identifiant de la ressource technique g	Gi _g
	Nom de la ressource technique g	Gn _g
	Numéro de série de la ressource technique g	Gs _g
	Date d'achat de la ressource technique g	Gd _g
	Type de la ressource technique g	Gt _g
Ressource humaine H		
	Identifiant de la ressource humaine h	Hi _h
	Nom de la ressource humaine h	Hn _h
	Prénom de la ressource humaine h	Hp _h
	Adresse de la ressource humaine h	Ha _h
	Téléphone de la ressource humaine h	Hx _h
	Section de la ressource humaine h	Hs _h
	Type de la ressource humaine h	Ht _h
Domaine I		
	Identifiant du domaine i	Ii _i
	Nom du domaine i	In _i
Élément de formation spécifié J		
	Identifiant d'un élément de formation spécifié j	Ji _j
	Durée de l'élément de formation spécifié j	Jd _j
	Capacité maximale de l'élément de formation spécifié j	Jc _j
	Type de l'élément de formation spécifié j	Je _j
	Thématique de l'élément spécifié j	Jt _j
Élément de formation planifié K		
	Identifiant d'un élément de formation planifié k	Ki _k
	Élément de formation spécifié correspondant à l'élément planifié k	Ke _k
Type de tâche de formation L		
	Identifiant du type de tâche de formation l	Li _l
	Nom du type de tâche de formation l	Ln _l
	Description du type de tâche de formation l	Ld _l
Type d'élément de formation M		
	Identifiant du type d'élément de formation m	Mi _m
	Nom du type d'élément de formation m	Mn _m
Type de ressource humaine N		
	Identifiant du type de ressource humaine n	Ni _n
	Nom du type de ressource humaine n	Nn _n
	Service horaire du type de ressource humaine n	Nh _n

Annexe 6. Catalogue de variables associées aux relations issues des associations du modèle

COMPREND Action de formation / tâche de formation	
Action de formation concernée c	
Tâche de formation concernée e	
COMPREND tâche de formation / thématique	
Thématique concernée f	
Tâche de formation concernée e	
EST INDISPOIBLE POUR 1 élément temporel / apprenant	
Apprenant concerné b	
Elément temporel concerné d	
EST INDISPOIBLE POUR 2 élément temporel / ressource humaine	
Ressourche humaine concernée h	
Elément temporel concerné d	
EST INDISPOIBLE POUR 3 élément temporel / ressource technique	
Ressourche technique concernée g	
Elément temporel concerné d	
CORRESPONT thématique / domaine	
Thématique concernée f	
Domaine concerné i	
INCLUT Phase de formation / Action de formation	
Phase de formation concernée a	
Action de formation concernée c	
MAITRISE Ressource humaine / Domaine	
Ressource humaine concernée h	
Domaine concerné i	
Degré de compétence	MRD _{hi}
PARTICIPE Apprenant / Elément de formation planifié	
Apprenant concerné b	
Element de formation planifié k	
PARTICIPE Apprenant / Phase de formation	
Apprenant concerné b	
Phase de formation concernée a	
PARTICIPE Apprenant / Thématique	
Apprenant concerné b	
Thématique concernée f	
PRE REQUIS Elément de formation spécifié / Elément de formation spécifié	
Element de formation spécifié j	
Element de formation spécifié j	
PRE REQUIS Thématique / Thématique	
Thématique concernée f	
Thématique concernée f	
REQUIERT Elément de formation spécifié / Type de Ressource Humaine	
Element de formation spécifié j	
Type de ressource humaine concerné n	
Quantité requise	RERHq _{in}
Degré de compétence requis	RERHd _{in}
REQUIERT Elément de formation spécifié / Type de Ressource Technique	
Element de formation spécifié j	
Type de ressource technique concerné o	
Quantité requise	RERHq _{po}
SE DERoule SUR Elément de formation planifié / élément temporel	
Element de formation planifié k	
Elément temporel concerné d	
UTILISE Elément de formation planifié / Ressource Humaine	
Element de formation planifié k	
Ressource humaine concernée h	
UTILISE Elément de formation planifié / Ressource Technique	
Element de formation planifié k	
Ressource technique concernée g	

$$\text{Calcul du premier cas : } \frac{\sum_{d=1}^D (x_{dk_1} \cdot d) - \frac{(Jd_{j_1} \cdot (Jd_{j_1} - 1))}{2}}{Jd_{j_1}} = \frac{4+5+6+7 - \left(\frac{4 \times 3}{2}\right)}{4} = 4$$

$$\text{Calcul du deuxième cas : } \frac{\sum_{d=1}^D (x_{dk_1} \cdot d) - \frac{(Jd_{j_1} \cdot (Jd_{j_1} - 1))}{2}}{Jd_{j_1}} = \frac{12+13+14+15 - \left(\frac{4 \times 3}{2}\right)}{4} = 12$$

Conclusion : On retrouve bien les instants de début de l'élément de formation **k** dans le premier et le second cas.

Cette contrainte devant être vérifiée pour chaque apprenant, nous avons introduit le paramètre x_{bk} manifestant la présence de l'élève **b** à l'élément de formation spécifié **k**.

Contrainte n°7 :

Tous les éléments de formation de même type (Cours, TD, TP,...) d'une même thématique seront assumés par les mêmes ressources humaines pour un même apprenant.

$$\forall f \in F, \forall m \in M, \forall b \in B, \forall h \in H \quad \frac{\sum_{k=1}^K (x_{hk} \cdot x_{bk})}{\sum_{k=1}^K (x_{bk})} = 1, Ke_k = Ji_j, Jt_j = Fi_f, Je_j = Mi_m$$

Afin d'expliquer cette contrainte, nous allons considérer 4 éléments de formation planifiés distincts correspondant au même type (Cours par exemple) et à la même thématique (Transformées de Laplace par exemple). 2 de ces éléments de formation planifiés sont à réaliser par les apprenants car ils correspondent à deux éléments de formation spécifiés distincts. Étudions plusieurs cas envisageables quant aux ressources assurant ce cours et aux élèves y participant :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9		H1	H2		B1	B2
K1											X			X	X
K2											X				X
K3												X			
K4												X		X	

Donc :

x_{hk}		k			
		1	2	3	4
h	1	1	1	0	0
	2	0	0	1	1

X_{bk}		k			
		1	2	3	4
b	1	1	0	0	1
	2	1	1	0	0

4 systèmes à traiter :

$$B=1, H=1, \quad \frac{\sum_{k=1}^K (x_{hk} \cdot x_{bk})}{\sum_{k=1}^K (x_{bk})} = 0.5$$

$$B=2, H=1, \quad \frac{\sum_{k=1}^K (x_{hk} \cdot x_{bk})}{\sum_{k=1}^K (x_{bk})} = 1$$

$$B=1, H=2, \quad \frac{\sum_{k=1}^K (x_{hk} \cdot x_{bk})}{\sum_{k=1}^K (x_{bk})} = 0.5$$

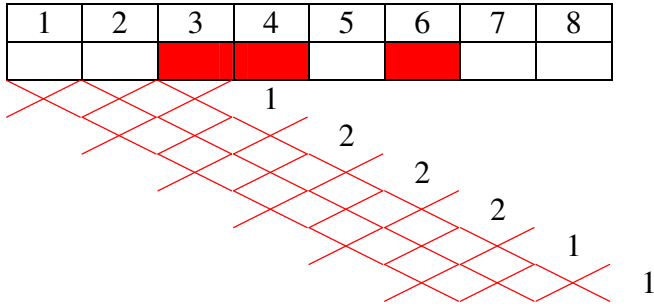
$$B=2, H=2, \quad \frac{\sum_{k=1}^K (x_{hk} \cdot x_{bk})}{\sum_{k=1}^K (x_{bk})} = 0$$

Contrainte n°10 :

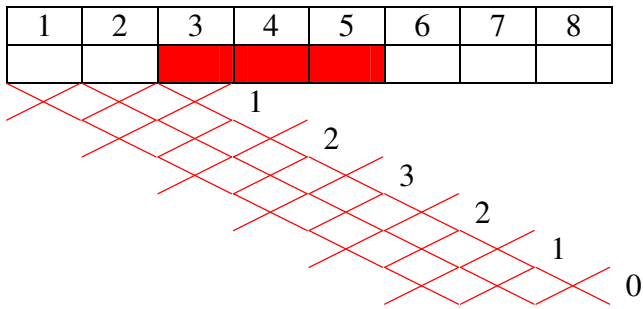
Chaque élément de formation planifié sera réalisé en une seule fois.

$$\forall d \in D, \forall k \in K, \sum_{i=1}^D \left[\sum_{d=i}^{i+Jd_j} (x_{dk}) \right]^2 \geq \frac{Jd_j \cdot (2 \cdot Jd_j^2 + 1)}{3}, Ke_k = Ji_j$$

Supposons deux éléments de formation planifiés k1 et k2 :



$$\sum_{i=1}^D \left[\sum_{d=i}^{i+Jd_j} (x_{dk}) \right]^2 = 1 + 4 + 4 + 4 + 1 + 1 = 15$$



$$\sum_{i=1}^D \left[\sum_{d=i}^{i+Jd_j} (x_{dk}) \right]^2 = 1 + 4 + 9 + 4 + 1 + 0 = 19$$

Or, $\frac{Jd_j \cdot (2 \cdot Jd_j^2 + 1)}{3} = \frac{3 \cdot (2 \times 9 + 1)}{3} = 19$, donc k1 ne satisfait pas à la contrainte imposée.

Contrainte n°11 :

L'ensemble des éléments temporels au sein desquels est planifié un même élément de formation planifié devront être compris dans une plage $[1 ; We]_{\text{modulo}(We)}$.

$$\forall k \in K, \left(\frac{\sum_{d=1}^D (x_{dk} \cdot d) - \frac{(Jd_j \cdot (Jd_j - 1))}{2}}{Jd_j} \right)_{\text{Modulo}(We)} + Jd_j \leq We, Ke_k = Ji_j$$

Soient k1 et k2 deux éléments de formation planifiés sur un calendrier constitué de périodes de longueur 8.

10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Période 2						Période 3						Période 4						

Pour k1, l'inéquation est vérifiée :

$$\left(\frac{\sum_{d=1}^D (x_{dk} \cdot d) - \frac{(Jd_j \cdot (Jd_j - 1))}{2}}{Jd_j} \right)_{Modulo(We)} + Jd_j = (17)_{Modulo(8)} + 6 = 7 \leq 8$$

Pour k2, l'inéquation n'est pas vérifiée :

$$\left(\frac{\sum_{d=1}^D (x_{dk} \cdot d) - \frac{(Jd_j \cdot (Jd_j - 1))}{2}}{Jd_j} \right)_{Modulo(We)} + Jd_j = (20)_{Modulo(8)} + 6 = 10 > 8$$