

**Modélisation et aide à la décision pour un
développement durable : état de l'art et perspectives**

**Rapport final au SPP Politique Scientifique (SPP-PS)
Action de support AS/F5/16**

Novembre 2003



Ce rapport a été réalisé par Paul-Marie Boulanger et Thierry Bréchet, membres de l'Institut pour un Développement Durable (IDD), dans le cadre du premier Plan d'Appui à une Politique de Développement Durable (PADD-I), Action de Support AS/F5/01.

Cette recherche a largement bénéficié des discussions entreprises avec nombre de personnalités, en premier lieu avec les responsables du programme au sein du SPP-PS, Georges Jamart et Hilde Van Dongen, mais également avec les membres du Comité d'accompagnement (Tom Bauler (ULB), Thomas Bernheim (Bureau fédéral du Plan), Anne Fierens (SPP-PS), Juliette de Villers (IBGE), Philippe Tulkens (Bureau fédéral du Plan), ainsi qu'avec Nicholas Christoforides (Commission européenne), Pierre Valette (Commission européenne) et Etienne Loute (CORE, Université catholique de Louvain).

TABLE DES MATIERES

Introduction	5
Chapitre 1. Résumé du rapport.....	7
1.1 OBJECTIFS DE LA RECHERCHE.....	7
1.2 LA METHODOLOGIE.....	7
1.3 UNE ANALYSE DES CLASSES DE MODELES	8
1.3.1 <i>Les modèles d'équilibre général calculables</i>	9
1.3.2 <i>Les modèles macro-économétriques</i>	9
1.3.3 <i>Les modèles d'optimisation centralisée</i>	9
1.3.4 <i>Les modèles de dynamique des systèmes</i>	9
1.3.5 <i>Les modèles multi-agents</i>	10
1.3.6 <i>Les réseaux bayésiens</i>	10
1.4 CONCLUSION ET PISTES DE RECHERCHE	11
Chapitre 2. Le cadre méthodologique	14
2.1 LE PROCESSUS DE DÉCISION.....	14
2.2 DEUX TYPES D'OUTILS D'AIDE À LA DÉCISION	16
2.3 LES MODÈLES	17
2.3.1 <i>Modèles et systèmes</i>	18
2.3.2 <i>Types de modèles</i>	19
2.4 QUELQUES OPPOSITIONS TRADITIONNELLES	20
2.4.1 <i>Statique vs dynamique</i>	21
2.4.2 <i>Micro versus macro</i>	22
2.4.3 <i>Bottom up versus top down</i>	22
2.4.4 <i>Simulation versus optimisation</i>	23
2.4.5 <i>Equilibre partiel versus équilibre général</i>	24
2.5 CRITÈRES POUR L'AIDE À LA DÉCISION EN MATIÈRE DE DÉVELOPPEMENT DURABLE	25
2.5.1 <i>L'interdisciplinarité</i>	27
2.5.2 <i>L'incertitude</i>	29
2.5.3 <i>La prise en compte du long terme</i>	30
2.5.4 <i>Glocalité (pour concilier globalité et localité)</i>	31
2.5.5 <i>Participation des parties prenantes</i>	32
2.5.6 <i>Relations entre les cinq critères</i>	32
2.6 FORMALISATION DES RELATIONS ENTRE MODÈLES, CRITÈRES ET PROBLÉMATIQUES	33
2.6.1 <i>L'interprétation des cotations</i>	35
2.6.2 <i>Choix des métriques</i>	36
Chapitre 3. Analyse comparative des classes de modèles	37
3.1 INTRODUCTION.....	37
3.2 ORGANISATION DES « FICHES-TYPES »	37
3.3 APERÇU DES CLASSES DE MODELES ANALYSES	38

3.4	LES MODELES MACRO-ECONOMETRIQUES	39
3.4.1	<i>Dénomination</i>	39
3.4.2	<i>Description générale</i>	39
3.4.3	<i>Domaines privilégiés d'application</i>	40
3.4.4	<i>Atouts et faiblesses</i>	40
3.4.5	<i>Matrice et commentaires</i>	41
3.5	LES MODELES MULTI-AGENTS	42
3.5.1	<i>Dénomination</i>	42
3.5.2	<i>Description Générale</i>	42
3.5.3	<i>Domaines d'application</i>	43
3.5.4	<i>Atouts et faiblesses</i>	43
3.5.5	<i>Matrice et commentaires</i>	45
3.6	LES MODELES D'EQUILIBRE GENERAL CALCULABLES	46
3.6.1	<i>Dénomination</i>	46
3.6.2	<i>Description générale</i>	46
3.6.3	<i>Domaines privilégiés d'application</i>	47
3.6.4	<i>Atouts et faiblesses</i>	47
3.6.5	<i>Matrice et commentaires</i>	48
3.7	LES RÉSEAUX BAYÉSIENS.....	49
3.7.1	<i>Dénomination</i>	49
3.7.2	<i>Description Générale</i>	49
3.7.3	<i>Domaines d'application</i>	50
3.7.4	<i>Atouts et faiblesses</i>	51
3.7.5	<i>Matrice et commentaires</i>	52
3.8	LES MODELES D'OPTIMISATION CENTRALISEE.....	53
3.8.1	<i>Dénomination</i>	53
3.8.2	<i>Description générale</i>	53
3.8.3	<i>Domaines privilégiés d'application</i>	53
3.8.4	<i>Atouts et faiblesses</i>	53
3.8.5	<i>Matrice et commentaires</i>	54
3.9	LES MODELES DE DYNAMIQUE DES SYSTEMES	55
3.9.1	<i>Dénomination</i>	55
3.9.2	<i>Description générale</i>	55
3.9.3	<i>Domaines privilégiés d'application</i>	56
3.9.4	<i>Atouts et faiblesses</i>	56
3.9.5	<i>Matrice et commentaires</i>	58
Chapitre 4. Analyse des thématiques et problématiques.....		59
4.1	INTRODUCTION.....	59
4.2	LA MATRICE PROBLEMATIQUES - CRITERES.....	60
4.3	LA THEMATIQUE DE L'ENERGIE	61
4.3.1	<i>Organisation de la discussion avec le Comité d'accompagnement</i>	61
4.3.2	<i>Une description des problématiques considérées</i>	62
4.3.3	<i>Une analyse de la matrice par problématique (en ligne)</i>	67
4.3.4	<i>Une analyse de la matrice par critère (en colonne)</i>	72
4.3.5	<i>Résultats de la discussion avec le Comité d'accompagnement</i>	72
4.4	LA THÉMATIQUE DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE.....	75
4.4.1	<i>Une description des problématiques</i>	75
4.4.2	<i>Problématiques et critères d'une approche en termes de développement durable</i>	78
4.4.3	<i>Analyse de la matrice par ligne</i>	80
Chapitre 5. Adéquation modèles / thématiques / critères : l'énergie		87
5.1	LA MATRICE MODÈLES / CRITÈRES	87
5.2	LA MATRICE CRITÈRES / PROBLÉMATIQUES.....	88
5.3	LA MATRICE MODÈLES / PROBLÉMATIQUES.....	89

5.4	COMPTE RENDU DE LA TABLE RONDE « ÉNERGIE »	91
5.4.1	<i>L'organisation de la table ronde</i>	91
5.4.2	<i>Les participants</i>	92
5.4.3	<i>Synthèse des discussions</i>	93
5.4.4	<i>Bilan de la Table ronde</i>	96
Chapitre 6. Adéquation Modèles/Thématique/Critères : l'aménagement du territoire		98
6.1	LA MATRICE MODÈLES / PROBLÉMATIQUES.....	98
6.2	LES MODÈLES D'USAGE DU SOL ET DE TRANSPORT : SOURCES THÉORIQUES	101
6.2.1	<i>Les modèles gravitationnels</i>	101
6.2.2	<i>Les modèles input-output</i>	102
6.2.3	<i>Le modèle monocentrique et les courbes de « bid-rent »</i>	102
6.2.4	<i>Les modèles écologiques</i>	104
6.3	LES PRINCIPAUX MODÈLES APPLIQUÉS	105
6.3.1	<i>Les modèles d'économie spatiale</i>	105
6.3.2	<i>Les modèles de dynamique des systèmes</i>	124
6.3.3	<i>Les modèles multi-agents</i>	131
6.4	CONCLUSIONS SUR LES MODELES D'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE.....	137
Chapitre 7. Synthèse et pistes de recherche.....		140
7.1	PRINCIPALES CONCLUSIONS DE L'ÉTUDE.....	140
7.2	PISTES DE RECHERCHE	142
7.2.1	<i>Du bon usage des modèles</i>	143
7.2.2	<i>Le temps et l'espace comme principes d'intégration</i>	146
7.2.3	<i>Metamodèles et Sustainability Impact Assessment</i>	150
Références bibliographiques		152
ANNEXE 1. Les termes de référence du projet de recherche		157
ANNEXE 2. Le formulaire distribué lors de la Table ronde.....		160

Introduction

Cette recherche s'inscrit dans le cadre de l'article 35 de l'Agenda 21 qui invite à « mettre au point et appliquer de nouveaux outils analytiques et prévisionnels permettant d'étudier avec plus de précision l'influence croissante de l'intervention de l'homme (...) et des tendances démographiques sur les systèmes naturels de la Terre, et de mesurer les effets et les conséquences de cette intervention et de cette dynamique ». Cet article énonce en outre la nécessité « d'appuyer la mise au point de nouveaux systèmes et techniques simples à utiliser et permettant de coordonner les processus multidisciplinaires - physiques, chimiques, biologiques et socio-humains - qui fournissent ensuite des informations et des connaissances aux décideurs et au grand public » : ce point constitue la motivation fondamentale de ce projet de recherche.

Plus précisément, l'objectif de ce projet était d'identifier les approches susceptibles de renouveler la pratique de l'aide à la décision en matière de développement durable à travers (i) la sélection, la confrontation et l'intégration des connaissances scientifiques acquises dans divers domaines en matière de développement durable, (ii) la promotion active de la communication et des échanges auprès des utilisateurs potentiels, à la fois en tant que scientifiques, responsables politiques ou autres.

La méthodologie poursuivie s'articule autour de trois leviers :

1. la nécessité d'une modélisation, pas nécessairement quantitative mais la plus rigoureuse possible afin de garantir l'objectivité et la reproductibilité des résultats ;
2. la recherche des niveaux les plus adéquats de décision et l'intégration des variables de commande correspondant à ces différents niveaux dans la modélisation ;
3. le tout au service d'une vision interdisciplinaire, intergénérationnelle et non-déterministe du développement.

Un cadre méthodologique a été conçu pour cette recherche. Il s'articule autour de cinq critères, critères que l'on retrouve souvent dans la littérature sur le développement durable mais généralement dispersés et, surtout, non déclinés en termes de modélisation et d'aide à la décision. Ces cinq critères sont les suivants : interdisciplinarité, intergénérationnalité, incertitude, « glocalité » (articulation des niveaux local/global) et participation des parties prenantes. Il nous a semblé que ces critères devaient être autant que possible respectés par les modèles pour que ceux-ci soient à même d'aborder une problématique de développement durable. Par ailleurs, il nous a semblé que ces cinq critères n'avaient pas nécessairement toujours la même portée selon la question posée, ce qui nous a amené à les appliquer à deux thématiques générales, l'aménagement du territoire et l'énergie, et aux problématiques qu'elles impliquent.

Cette recherche rejoint, outre l'Agenda 21, le Rapport fédéral sur le développement durable 2002 à travers les principes et les critères d'une prise de décision conforme aux exigences du développement durable (Bureau fédéral du Plan, 2002). Elle provient en outre d'un constat selon lequel le développement durable n'est pas suffisamment pris en considération dans les

cénacles qui influencent, d'un regard « scientifique », la prise de décision, ce regard étant entendu ici sous l'angle très restrictif des modèles appliqués. Le développement durable demeure aujourd'hui un chantier trop peu défriché pour que le modélisateur s'y aventure, surtout s'il est confronté à la prise de décision. La motivation de cette recherche est d'identifier les points forts et les points faibles des modèles actuels à cet égard, leurs potentiels (et ils sont nombreux), et les pistes de recherche futures. Cette recherche vise à opérationnaliser le concept de développement durable à travers les modèles appliqués utilisés pour la prise de décision. La citation suivante illustre cette ultime motivation : « Most writings on sustainable development start from scratch and some proceed to get things hopelessly wrong. It would be difficult to find another field of research endeavor in the social sciences that has displayed such intellectual regress »¹.

Ce rapport est organisé de la manière suivante. Le premier chapitre présente un résumé non technique de la démarche suivie et des principaux résultats. Le deuxième chapitre expose les fondements du cadre méthodologique développé dans cette étude à travers le recours à cinq critères et à l'analyse de leur représentation méthodologique. Une attention est également portée, dans ce chapitre, à l'analyse du processus de décision et au rôle des modèles au sein de ce processus. Enfin, le cadre formel complet y est exposé à travers la formalisation des relations sous les trois dimensions appréhendées dans cette analyse : celle des modèles, celle des problématiques traitées et celle des critères du développement durable. Le noyau méthodologique de cette recherche réside dans ce chapitre, et notamment, du point de vue formel, dans sa dernière partie. La suite du rapport décline ce cadre méthodologique en passant successivement, à travers le crible des cinq critères, par les classes de modèles, les thématiques et leurs problématiques spécifiques, puis le bouclage entre les classes de modèles et les problématiques.

Ainsi, le chapitre 3 s'attache à décrire et expliciter les grandes classes de modèles exploitées aujourd'hui pour le soutien à la prise de décision : leur capacité à prendre en compte les critères du développement durable est évaluée. Le chapitre 4 s'intéresse aux deux thématiques retenues dans cette recherche, l'aménagement du territoire et l'énergie. Ces thématiques sont décomposées en problématiques, celles-ci devant être vues comme des déclinaisons concrètes des thématiques considérées : la prégnance de ces problématiques pour une politique de développement durable est appréhendée à l'aune des cinq critères. Les chapitres 5 et 6 bouclent l'analyse en mettant en évidence la capacité des classes de modèles à rendre compte des problématiques considérées dans chacune des deux thématiques et, partant, de leur capacité actuelle ou potentielle à contribuer à une prise de décision en matière de développement durable. Enfin, le chapitre 7 présente une synthèse des résultats et une série de pistes de recherche.

¹ P. Dasgupta and K.G.Mäler, "Poverty, institutions and the Environmental-Resource Base" in *Handbook of Development Economics*, eds J. Berhrman and T.N. Srinivasan, Amsterdam, North-Holland, 1995.

Chapitre 1. Résumé du rapport

1.1 Objectifs de la recherche

Cette recherche trouve sa motivation dans le constat suivant : trop souvent, le développement durable est abordé avec des instruments de modélisation et d'aide à la décision préexistants, c'est-à-dire construits initialement pour une prise de décision appliquée à des questions politiques « traditionnelles ». L'approche scientifique qui est au fondement de ces modèles est généralement uni-disciplinaire et uni-générationnelle, ce qui va à l'encontre des principaux défis inhérents au développement durable (voir la définition du rapport Brundtland). Un examen attentif de ces modèles révèle également d'autres faiblesses méthodologiques importantes ; en particulier, le domaine de l'incertain et de l'aléatoire est réservé au futur et aux décisions humaines alors qu'il imprègne de bout en bout nos connaissances actuelles ; la prise de décision y est souvent envisagée au niveau d'un régulateur centralisé (l'Etat) alors que le développement durable suppose une implication beaucoup plus importante des différents échelons décisionnels ; enfin, les interactions entre dimensions locales et globales sont généralement sous-estimées. Des modèles efficaces pour le développement durable devraient donc réunir les conditions suivantes : être interdisciplinaires, pouvoir adopter un horizon temporel de moyen et long terme et/ou modéliser explicitement les générations, prendre en compte l'aléatoire et l'incertain, déterminer le niveau optimal de décision et incorporer les variables de commande pertinentes à ce niveau. Cet objectif rejoint l'article 35 de l'Agenda 21 qui invite à « mettre au point et appliquer de nouveaux outils analytiques et prévisionnels permettant d'étudier avec plus de précision l'influence croissante de l'intervention de l'homme (...) et des tendances démographiques sur les systèmes naturels de la Terre, et de mesurer les effets et les conséquences de cette intervention et de cette dynamique ».

L'objectif de cette recherche est donc d'identifier les approches de la modélisation appliquée susceptibles de renouveler la pratique de l'aide à la décision en matière de développement durable par la sélection, la confrontation et l'intégration des connaissances scientifiques acquises dans divers domaines en matière de développement durable. La méthodologie est articulée autour de trois leviers : (i) la nécessité d'une modélisation, pas nécessairement quantitative mais la plus rigoureuse possible afin de garantir l'objectivité et la reproductibilité des résultats ; (ii) la recherche des niveaux les plus adéquats de décision et l'intégration des variables de commande correspondant à ces différents niveaux dans la modélisation ; (iii) le tout au service d'une vision interdisciplinaire, intergénérationnelle et non-déterministe du développement.

1.2 La méthodologie

La méthode retenue a d'abord consisté à sélectionner les critères auxquels confronter les différents outils afin d'évaluer leur aptitude à aider la prise de décision en matière de

développement durable. Un survol de la littérature consacrée à l'évaluation en terme de développement durable fait apparaître l'importance de cinq grandes exigences :

- L'interdisciplinarité : indispensable pour rendre compte des interactions entre des dynamiques de nature très différente : physico-chimiques, biologiques, psychosociologiques, économiques, etc.
- La capacité d'adopter une perspective de long terme, une exigence inscrite au cœur même de l'idée de durabilité et justifiée par la recherche de l'équité inter-générationnelle.
- La prise en compte des interactions entre niveaux territoriaux, entre le local et le global. Cette exigence est particulièrement apparente dans les problèmes de changement climatique dont il est établi qu'ils sont le résultat d'agrégation au niveau du globe tout entier d'une infinité de comportements observables à une échelle géographique très réduite. En retour, des modifications affectant l'atmosphère terrestre dans sa globalité ont des répercussions extrêmement variables au niveau local.
- Le traitement de l'incertitude : celle-ci est évidemment étroitement liée aux trois critères précédents. Plus l'horizon temporel est éloigné, plus nombreux sont les niveaux pris en considération, plus nombreux aussi les savoirs disciplinaires à mettre en relation, plus les incertitudes sont grandes.
- La participation des parties prenantes : cette exigence découle à la fois de l'importance des incertitudes et des fondements mêmes du développement durable. Elle se justifie donc à la fois sur un plan instrumental (pallier les incertitudes, tenir compte des savoirs locaux) et sur un plan normatif (approfondir la démocratie).

Pour pouvoir confronter les différents paradigmes de modélisation à ces critères, une étape supplémentaire doit être franchie : leur traduction en termes méthodologiques plus précis et plus opérationnels. Que veut dire, par exemple, l'interdisciplinarité en modélisation ? Clairement, le critère demande à être traduit dans le langage spécifique de la modélisation, c'est-à-dire en termes de variables (d'état, d'input, d'output, de commande, etc.) et de relations entre variables. Il en va de même pour les autres critères. Ainsi, la prise en compte du « long terme » ne signifie pas nécessairement que le modèle doit pouvoir être simulé sur des périodes de 25 ou 50 années ou davantage. Le simple fait de se placer dans une optique pluri-générationnelle peut à certaines conditions s'assimiler à une vision à long terme, etc.

1.3 Une analyse des classes de modèles

Les cinq critères sélectionnés, une fois traduits en termes épistémologiques, ont été confrontés aux principales classes de modèles utilisés actuellement en soutien à la prise de décision : modèles d'équilibre général calculables, macro-économétriques, d'optimisation centralisée, de dynamique des systèmes, multi-agents et réseaux bayésiens. Il s'agit de classes générales de modèles dans lesquelles peuvent se ranger la plupart des modèles concrets utilisés pour l'aide à la décision ou l'étude du développement durable. Une cotation très sommaire en trois positions a été adoptée pour exprimer à quel point chacune de ces approches nous paraissait les rencontrer. Moins que les cotes elle-mêmes, ce sont surtout les arguments qui les justifient qui nous paraissent revêtir un certain intérêt. Par ailleurs, il ne s'agit nullement de se poser en juge ou en censeur par rapport à l'une ou l'autre école de pensée mais de s'engager dans une démarche collective visant à faire évoluer les outils scientifiques et techniques en vue de les adapter aux besoins des politiques de développement durable. Passons rapidement en revue ces classes de modèles.

1.3.1 Les modèles d'équilibre général calculables

Ces modèles s'appuient sur la théorie économique néoclassique : la dynamique économique résulte de la confrontation, par les mécanismes de marché, des comportements individuels des consommateurs, des producteurs et du régulateur (l'Etat). L'ajustement entre les offres et les demandes pour les biens présents sur les marchés détermine les prix relatifs de ces biens, lesquels reflètent, par-là, les *préférences* des individus. Les atouts principaux de cette classe de modèles résident dans ces fondements théoriques des comportements individuels et leur interdépendance, bien que ce soit au prix d'un certain détachement par rapport au réalisme. Si ces modèles sont capables d'analyses intergénérationnelles en terme de bien-être, ils sont néanmoins peu propices à des approches interdisciplinaires.

1.3.2 Les modèles macro-économétriques

Les modèles macro-économétriques ont été conçus pour évaluer les impacts des politiques macroéconomiques de stabilisation. Ils sont validés par des méthodes économétriques et permettent la réalisation de projections de court et moyen termes. Ils sont couramment utilisés pour guider les politiques économiques. Leur atout principal réside dans cette insertion au sein du processus de décision et dans leur capacité à produire des évaluations quantitatives réalistes et réfutables. Ils sont cependant restreints aux analyses de moyen terme et essentiellement ouverts aux questions socio-économiques et environnementales.

1.3.3 Les modèles d'optimisation centralisée

Exploitant les méthodes de la recherche opérationnelle, ces modèles sont avant tout orientés vers une description des choix technologiques. Une fonction objectif est déterminée (minimisation des coûts) et le modèle permet d'identifier les options technologiques qui, sous respect des contraintes imposées (disponibilité des technologies, prix, demande), remplissent le mieux cet objectif. Ces modèles sont donc davantage normatifs que descriptifs dans le sens où ils fournissent la meilleure solution au problème posé, sans dire sous quelles conditions cette solution est réalisable. Ils ne reposent pas sur une description des comportements d'agents individuels. Ces modèles permettent néanmoins une approche prospective des choix technologiques. Ils peuvent en outre être enrichis de comportements économiques et d'aspects environnementaux.

1.3.4 Les modèles de dynamique des systèmes

Leur atout principal est leur interdisciplinarité. Tout ce qui peut être représenté en termes de stock et de flux et sous forme d'équation différentielle trouve place dans les modèles de type dynamique des systèmes. C'est, notamment, une façon très naturelle de représenter des écosystèmes. Par ailleurs, la théorie (générale) des systèmes sur lesquelles ils sont fondés fournit une sorte de métathéorie qui permet la communication entre disciplines différentes. Ils sont particulièrement bien adaptés aux problèmes de long terme. En revanche le traitement des interactions entre niveaux y est particulièrement problématique, à moins d'interconnecter plusieurs modèles de DS. Ils se prêtent assez mal à la gestion de l'incertitude, étant donné le caractère rigide des relations entre variables et le nombre très élevé de paramètres ou de coefficients à prendre en compte pour une analyse de sensibilité.

1.3.5 Les modèles multi-agents

Le potentiel des modèles multi-agents est considérable pour la prise en compte du développement durable parce qu'ils se révèlent, au terme de notre analyse, les plus performants sur les cinq critères retenus. Ces performances s'expliquent par leur caractère « bottom-up », leur non-linéarité naturelle et, par dessus tout, par leur aptitude à représenter les interactions entre les agents et leur environnement. Certes, toutes les applications en modélisation multi-agents n'ont pas de composante spatiale, mais la grande majorité d'entre elles prennent en compte les interactions d'agents sur et avec un « territoire » et donc un environnement. Leur handicap principal tient à leur relative jeunesse, ce qui explique que certaines étapes de la modélisation telles que le calibrage et la validation des modèles posent encore de nombreux problèmes. C'est vraisemblablement dans ces domaines que le besoin de R&D se fait le plus sentir.

1.3.6 Les réseaux bayésiens

Il s'agit avant tout de modèles d'évaluation du risque et l'on ne s'étonnera donc pas si leur atout majeur réside dans le traitement de l'incertitude. Néanmoins, ils ont d'autres atouts. Ainsi de l'interdisciplinarité : des variables appartenant à des domaines totalement distincts peuvent être associées dans un réseau bayésien pour autant qu'elles puissent s'exprimer en termes probabilistes. Le caractère graphique du réseau bayésien facilite la communication avec les parties prenantes. Les interactions entre niveaux peuvent être prises en compte mais de manière limitée étant donné que les modèles de RB sont acycliques et ne permettent donc pas de représenter les feedbacks de façon naturelle. Ajoutons enfin qu'il ne s'agit pas de modèles dynamiques et que la prise en compte du temps y est peu satisfaisante.

Cette analyse des différentes classes de modèles peut s'interpréter comme une matrice $M.C$, où M représente le nombre de classes de modèles envisagés, C étant le nombre de critères. Une fois cette matrice constituée, l'analyse prend un tour plus concret en se penchant sur les pratiques de modélisation dans deux thématiques exemplatives du développement durable: l'énergie et l'aménagement du territoire. Chacune de ces thématiques peut être décomposée en un certain nombre de problématiques. Ainsi, pour l'énergie, les problématiques du nucléaire, des ressources renouvelables, de l'utilisation rationnelle de l'énergie, de l'accès des populations (du Sud, en particulier) aux services énergétiques, etc. Dans le cas de l'aménagement du territoire, on touche aux problématiques de la mobilité, de la gestion de l'eau, de la biodiversité, de l'exclusion sociale, de l'énergie, des aménités paysagères, etc..

Chacune de ces problématiques, envisagée dans une perspective de développement durable, requiert également une démarche plus ou moins interdisciplinaire, à plus ou moins longue échéance, etc. Autrement dit, pour pouvoir apprécier l'importance du respect des cinq critères définis plus haut dans le cadre de thématiques concrètes comme l'énergie ou l'aménagement du territoire ou de toute autre thématique qui entre dans le champ du développement durable (l'eau, la biodiversité, la pauvreté, etc.), il est nécessaire d'examiner dans quelle mesure les problématiques qui les constituent exigent, elles-aussi, le respect des cinq critères.

L'exercice de confrontation des critères aux problématiques suppose une grande familiarité avec celles-ci dont les chercheurs ne pouvaient se prévaloir. C'est pourquoi la démarche suivie a été essentiellement participative. Elle a consisté à demander aux membres du comité d'accompagnement de remplir, pour leur compte un tableau croisé « problématiques-critères », en attribuant à chaque case une cote indiquant à quel point le critère c est important pour la prise en compte de la problématique p . Les matrices ainsi recueillies et celles proposées par les chercheurs ont alors été discutées et une matrice de synthèse constituée de commun accord.

A ce stade de la recherche, on disposait donc pour chaque thématique d'une matrice $M.C$, croisant les modèles et les critères ainsi que d'une matrice $C.P$, croisant les critères et les problématiques. L'adéquation relative des types de modèles à la thématique analysée, c'est-à-dire aux problématiques qui la constituent et qui peut s'exprimer dans une matrice $M.P$ (modèles-problématiques) peut alors être obtenue par une opération logique ou mathématique, comme par exemple un produit matriciel.

La matrice $M.P$ est donc le résultat d'une opération qui tient compte simultanément de l'importance de chaque critère pour chaque problématique et de la plus ou moins grande aptitude du type de modèle à respecter le critère en question. Ainsi, une classe de modèles qui est moins performante pour le critère "participation des parties-prenantes", par exemple, sera d'autant moins adaptée à la thématique analysée que celle-ci comprend un plus grand nombre de problématiques pour lesquelles la participation des parties prenantes est importante.

1.4 Conclusion et pistes de recherche

Il nous semble que l'approche adoptée ici peut être étendue dans plusieurs directions. Tout d'abord, elle peut s'appliquer à d'autres thématiques (comme l'eau, la biodiversité, le changement climatique, etc.) pour dégager ensemble, développeurs de modèles, utilisateurs et commanditaires, les orientations à privilégier en matière de R&D. Elle peut aussi s'appliquer à d'autres types d'outils que les modèles proprement dit comme les méthodes multi-critères, par exemple. Elle peut enfin aider les pouvoirs publics à sélectionner les outils les plus appropriés pour effectuer les évaluations en terme de développement durable de leurs plans, programmes et stratégies. En effet, à partir d'une matrice « outils-critères » et d'une matrice « critères-problèmes », la méthode permet de dégager la matrice « outils-problèmes » recherchée. Notons que la démarche peut également s'effectuer dans le sens « outils-problèmes » et « problèmes-critères », débouchant alors sur une matrice « outils-critères ».

Parmi les différentes approches de modélisation analysées dans cette recherche, celle qui paraît la mieux adaptée aux exigences d'une politique de développement durable est aussi la plus récente et la plus expérimentale : il s'agit des modèles de simulation multi-agents. En revanche, les techniques les plus utilisées, et donc aussi les plus éprouvées, sont au départ celles qui souffrent le plus des lacunes constatées initialement, ce qui était prévisible puisque ce sont ces lacunes qui ont motivé cette recherche. L'analyse a cependant permis d'identifier précisément ces lacunes ainsi que, le cas échéant, les moyens d'y remédier plus ou moins partiellement. Par exemple, un usage plus systématique des analyses de sensibilité permettrait d'introduire davantage la notion d'incertitude dans les diagnostics fournis par les modèles.

L'analyse par thématique confirme partiellement ce diagnostic. C'est dans le domaine de l'aménagement du territoire que les avancées sont les plus significatives. Celles-ci sont dues pour l'essentiel à l'utilisation et à la mise en relation d'outils différents pour la simulation proprement dite, l'élaboration des scénarios, la visualisation des résultats, etc. Il faut cependant ajouter que certaines approches se prêtent plus facilement que d'autres à cette mise en réseau d'outils. Toutefois, le facteur le plus important d'intégration est la représentation explicite de l'espace et sa visualisation grâce aux Systèmes d'Information Géographique (GIS, en anglais) qui permet la superposition, tout en conservant un référentiel commun, de dynamiques et de temporalités différentes.

En ce qui concerne la thématique de l'énergie, les échanges qui se sont tenus lors de la table ronde ont révélé que des pratiques participatives y avaient déjà cours à un degré plus ou moins explicite et plus ou moins institutionnalisé sans que les développeurs n'en aient toujours vraiment conscience. Certes, les paradigmes dominants en la matière ne sont pas *a priori* les

plus performants du point de vue des cinq critères retenus, peut-être parce qu'il s'agit des plus anciens et donc également des plus éprouvés, mais leur analyse a révélé qu'ils offraient souvent une contribution spécifique importante à l'évaluation des politiques pour leur contribution au développement durable. Cette contribution ne doit pas être occultée.

Globalement, les approches de modélisation appliquées utilisées en soutien à la prise de décision devraient être à la fois diversifiées (recours à des paradigmes plus adaptés aux enjeux spécifiques du développement durable, tels que le multi-agents) et améliorées par l'exploitation de techniques ou de pratiques permettant de mieux rencontrer les aspects liés à l'intergénérationnel, à l'interdisciplinaire, à la participation, à l'incertitude et à la globalité des questions rencontrées aujourd'hui par la politique économique.

Les résultats obtenus concernant l'adéquation des classes de modèles à la problématique du développement durable peuvent être naturellement étendus à la construction de « métamodèles » au sein desquels les énoncés (lois, généralisations empiriques) de différentes disciplines peuvent être articulés en vue d'une évaluation intégrée en termes de développement durable (« Sustainability Impact Assessment »). Les cinq critères retenus gardent toute leur pertinence dans cette perspective et les conclusions concernant l'adéquation de telle ou telle approche peuvent donc être extrapolés à la construction de ces métamodèles.

Cependant, il apparaît que certaines méthodologies offrent un « plus » par rapport aux critères retenus : celui de proposer un ou plusieurs principes intégrateurs qui facilitent l'intégration des connaissances et la participation des parties prenantes. C'est le cas des « réseaux bayésiens » et de la « dynamique des systèmes ». Dans le cas des premiers, le principe intégrateur est le concept de probabilité et donc de risque. Dans le second, c'est la notion de système. Ces principes intégrateurs sont à la base de deux véritables métathéories. L'une, la théorie bayésienne des probabilités est une métathéorie de la connaissance, de l'information et de la croyance. L'autre, la théorie des systèmes, constitue une métaphysique scientifique, une ontologie scientifique du monde comme systèmes composés d'une hiérarchie de sous-systèmes. Le fait de se baser sur l'une ou l'autre de ces métathéories constitue sans doute la raison pour laquelle les réseaux bayésiens et les modèles de dynamique de système paraissent plus aptes que d'autres à servir de base aux métamodèles nécessaires à l'évaluation intégrée du développement durable.

Cependant, ces principes intégrateurs se situent à un niveau élevé d'abstraction, certes compréhensible pour des scientifiques mais qui ne facilite guère la participation des autres parties prenantes. D'autres formes d'intégration basées sur d'autres principes sont donc requis. L'analyse des modèles développés dans le cadre des problèmes d'aménagement du territoire a mis en évidence le rôle de la représentation de l'espace comme principe effectif d'intégration. Un des facteurs qui peuvent expliquer ce rôle est le fait que l'espace s'offre à des représentations graphiques (cartes, systèmes d'information géographique, simulations en trois dimensions, animations, etc.) qui sont d'un niveau de réalisme largement supérieur à n'importe quel texte et même n'importe quel schéma ou diagramme. Dans le cadre de ces représentations, ce qui, dans le discours scientifique est exprimé en termes de système (écosystèmes, systèmes hydriques, systèmes économiques, etc.), et donc d'entités abstraites s'incarne en autant d'objets concrets : prairies, rivières, usines, routes, arbres, véhicules en déplacement, etc. que chacun peut reconnaître. Dans toute la mesure du possible, on cherchera donc à construire les métamodèles en prenant l'espace comme principe intégrateur, avec les différentes couches qui le constituent (l'espace, de ce point de vue, est fait d'un empilement de plans) et les objets naturels ou artificiels qui les « peuplent ».

Le type d'intégration que permet la représentation explicite de l'espace reste encore cependant de l'ordre du cognitif même si à un niveau plus concret que ce que permettent les notions de système ou de probabilité. Mais l'évaluation en termes de développement durable demande

encore un autre type d'intégration, en termes de valeurs cette fois. C'est le problème principal que tente de résoudre une autre classe d'outils de l'aide à la décision, qui se situent davantage du côté de l'acteur, du décideur que du système. Il s'agit des méthodes d'analyse coûts-avantages ou coûts-efficacité, des méthodologies multi-critères et des instruments participatifs d'évaluation et de décision.

L'aide à la décision en termes de développement durable peut donc se résumer à la recherche de deux principes intégrateurs, l'un au niveau cognitif, l'autre au niveau axiologique. Car il s'agit, d'une part, d'unifier des croyances et des savoirs et de l'autre d'agrèger des jugements de valeur. Seule la première opération nous a retenu ici. L'autre n'est pas moins importante.

Chapitre 2. Le cadre méthodologique

Dans ce chapitre nous présentons d'abord de façon très schématique les étapes du processus de la décision de façon à mettre en évidence le rôle spécifique des différents outils scientifiques d'aide à la décision et, particulièrement, celui des modèles, qui constituent l'objet de cette étude. Nous détaillons ensuite les exigences que la notion - et les problèmes concrets - de développement durable entraînent pour la préparation et l'évaluation des décisions politiques. Enfin, nous présentons de manière un peu plus formelle la logique de notre démarche qui consiste à confronter aux critères retenus tout d'abord des types généraux de modèles, puis des thématiques concrètes désagrégées en autant de problématiques, pour en déduire ensuite une évaluation de l'adéquation des types de modèles aux thématiques retenues à titre d'exemple.

2.1 Le processus de décision

Pour la théorie formelle de la décision (French, 1988), tout problème de décision peut se présenter comme un tableau ou une matrice (*cf.* tableau 1) où chaque ligne correspond à une des actions ou décisions disponibles pour le décideur et chaque colonne à un état possible de l'environnement, résultant de l'interaction de tous les facteurs externes indépendants de l'action du décideur. Au croisement des lignes et des colonnes, chaque case exprime le résultat de l'action ou de la *décision* i compte tenu de l'état de l'environnement j .

Tableau 1. Le problème de la décision

Etat de l'environnement					
		q_1	q_2	...	q_n
Actions	a_1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1n}
	a_2	x_{21}	x_{22}		x_{2n}

	a_m	x_{m1}	x_{m2}		x_{mn}

On voit que, dans cette vision abstraite de la décision :

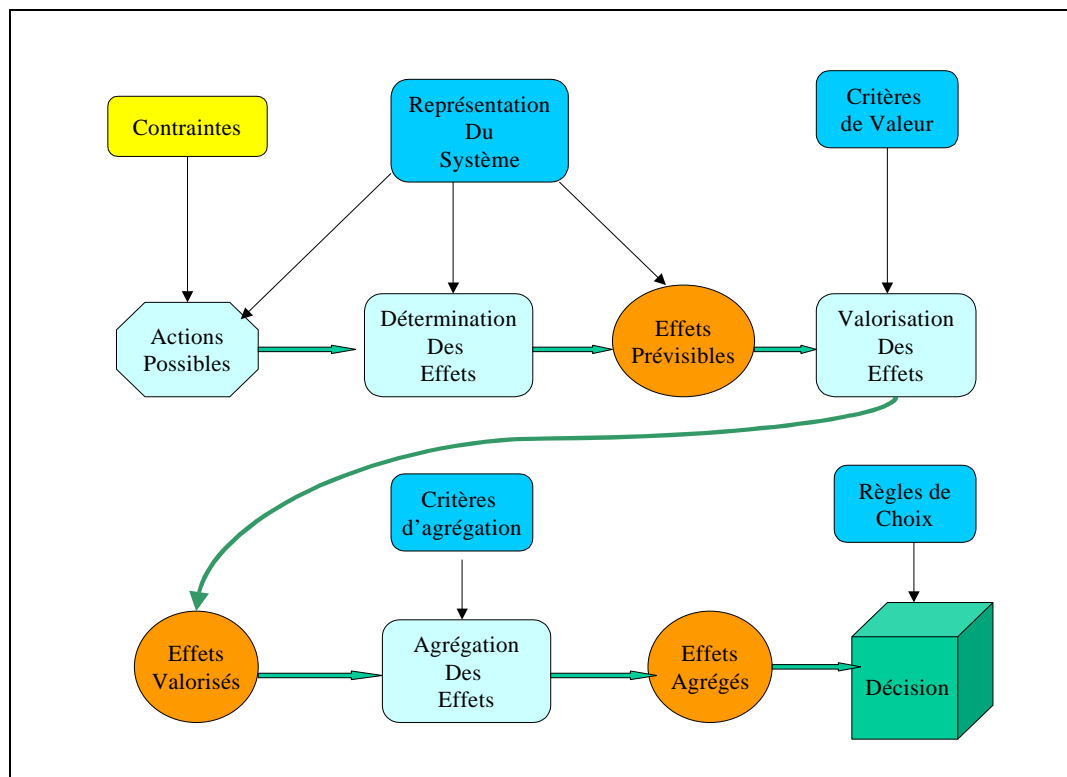
- l'ensemble des alternatives possibles (actions et décisions) est fini et connu ;
- les différentes alternatives sont mutuellement incompatibles;

- l'ensemble des états possibles de l'environnement est fini et connu ;
- les conséquences de chaque alternative pour chaque état de l'environnement sont connues.

Une fois ces conditions satisfaites, décider reviendrait alors à évaluer les différentes alternatives, c'est-à-dire à valoriser les conséquences de chacune d'entre elles en termes d'utilité pour le décideur et à sélectionner la meilleure, c'est-à-dire celle qui satisfait au mieux le critère de satisfaction retenu (espérance mathématique, *minimax*, *maximim*, etc.).

Cependant, si, *stricto sensu*, décider c'est effectivement choisir entre plusieurs options mutuellement incompatibles, l'aide à la décision et les diverses techniques qui ont été développées à cette fin donnent une image beaucoup moins restrictive de celle-ci, et dont la notion de processus décisionnel rend mieux compte. Concrètement, la décision constitue un processus complet de recherche d'information, d'évaluation et de sélection afin d'agir sur un système déterminé en vue d'atteindre un ou plusieurs objectifs. Ce processus comprend d'abord une phase d'identification des différentes actions possibles (en ce compris le laisser-faire, la non-intervention) sur le système, puis une phase d'évaluation de leurs conséquences respectives, une phase de sélection de l'une (ou plusieurs en cas de programme d'actions) d'entre elles en fonction de critères de préférence ensuite, et, enfin, une phase d'implémentation de la décision. Le schéma ci-dessous² représente les principales étapes de ce processus.

Schéma 1 Le processus de décision



² Adapté de Walliser (1977, p. 203). Cette vision du processus de prise de décision descend en droite ligne de Cyert et March (1963). Pour une représentation similaire, cfr. Zoller et Beghin (1993, p. 70).

La valorisation des effets consiste à établir un classement entre ceux-ci en fonction des préférences et des objectifs du décideur. Ce classement peut être exprimé de façon qualitative, en termes de « variables linguistiques » (par exemple : très mauvais, mauvais, moyen, etc.), ou quantitative au moyen d'une métrique quantitative appropriée (le bruit en décibels, par ex.) ou en termes monétaires. Un des domaines les plus controversés dans l'aide à la décision en matière environnementale consiste en la traduction en termes monétaires d'effets initialement – et diront certains, fondamentalement - « non marchands » tels que des niveaux de pollution, des disparitions d'espèces vivantes, etc.

La question de l'agrégation se pose par rapport à différents critères :

- le temps : il s'agit alors d'agrèger en une valeur unique la séquence temporelle des valeurs prises à chaque intervalle de temps considéré, ce qui pose le problème de l'actualisation du futur ;
- Les critères éventuellement multiples de valeurs ou d'indicateurs, ce qui pose le problème de la pondération ;
- Les états possibles de l'environnement dans le cas des décisions en avenir incertain ;
- Les différents groupes sociaux affectés par la décision.

2.2 Deux types d'outils d'aide à la décision

Cette représentation du processus décisionnel permet d'identifier les lieux d'intervention d'une démarche de modélisation et de situer les uns par rapport aux autres les différents outils auxquels peuvent recourir les décideurs.

On peut, à cet égard, distinguer deux grandes catégories d'outils : d'une part, ceux qui portent essentiellement sur la représentation des préférences du décideur (sachant que celui-ci peut être une collectivité et donc une population d'acteurs singuliers) et sur la traduction des effets prévisibles dans des termes (des valeurs) qui permettent un choix rationnel compte tenu de ces préférences, d'autre part, ceux qui permettent d'identifier les alternatives possibles et leurs effets prévisibles sur les objectifs recherchés.

Dans le premier cas, il s'agit essentiellement de méthodes et de procédures qui garantissent l'adéquation la plus parfaite possible entre les intérêts bien compris du décideur, les ressources disponibles et les contraintes existantes. C'est ce qu'on appelle généralement les « méthodes d'aide à la décision ». Elles comprennent la valorisation des effets prévisibles, leur agrégation et le choix final entre les différentes actions au vu de leurs conséquences valorisées.

« En pratique, les phases de valorisation, d'agrégation et de choix constituent une phase globale d'évaluation qui utilise des méthodes combinant diverses règles... » (Walliser, 1977 : 210). Le tableau ci-dessous compare trois grandes méthodes d'aide à la décision, extrêmement répandues, et qui peuvent se présenter chacune sous de nombreuses variantes.

Le type d'outil d'aide à la décision dont nous venons de parler se concentre donc essentiellement sur les phases finales du processus décisionnel et accorde peu d'importance aux phases d'identification des actions possibles et d'exploration des effets prévisibles. Ce sont cependant les deux étapes où l'information disponible et l'état des connaissances du « décideur » concernant le système jouent un rôle fondamental. L'aide à la décision consiste ici à enrichir cette information et cette connaissance, principalement au moyen d'outils qui cette fois ne prennent pas pour objet les buts et les préférences du ou des décideurs mais le

comportement du système lui-même et la façon dont il est susceptible de réagir aux actions envisagées.

Tableau 2. Typologie des méthodes d'aide à la décision

Nom de la méthode	Valorisation des effets	Agrégation des effets et choix
<i>Analyse coûts avantages</i>	<i>Tous les effets monétarisés</i>	<i>Maximisation de la somme des effets monétarisés</i>
<i>Analyse coûts efficacité</i>	<i>Un effet quantifié (l'efficacité) Tous les autres monétarisés</i>	<i>1. Maximisation de l'efficacité à coût donné 2. Minimisation du coût à efficacité donnée 3. Maximisation du ratio efficacité/coût</i>
<i>Analyse multi-critères</i>	<i>N effets quantifiés</i>	<i>Nombreuses techniques</i>

2.3 Les modèles

Tant l'identification des actions possibles que celle de leurs effets prévisibles supposent une représentation, fut-elle implicite, du système dans le cadre duquel les buts et les contraintes du décideur se situent.

Notamment, l'identification des actions possibles pour l'acteur suppose qu'il dispose d'une représentation du système considéré où soient distinguées les variables sur lesquelles il peut agir et celles sur lesquelles il n'a pas ou moins de contrôle. Les premières sont généralement appelées, dans le vocabulaire de la théorie des systèmes, les variables de commande (*control variables*). Soit dit en passant, l'identification des variables de commande du système s'accompagne nécessairement d'une représentation au moins implicite également (c'est-à-dire d'un modèle) du décideur lui-même et de ses moyens d'action. Une variable de commande se situe en effet à l'intersection de deux ensembles : l'ensemble des variables constitutives du modèle du décideur et celui des variables entrant dans la définition du modèle du système. Notons également que même si le décideur fait lui-même partie du système considéré (comme l'Etat dans une société politique, le management dans une entreprise, etc.), le processus de décision suppose qu'il se représente comme séparé de celui-ci, comme extérieur à lui pour les besoins de l'action. Pour pouvoir décider, il faut aussi disposer d'une représentation des conséquences possibles d'un changement de valeur d'une ou plusieurs variables de commande sur les autres variables du système, celles que l'on cherche à modifier (les variables d'objectif) et donc d'une représentation de la relation entre les unes et les autres. Cette représentation peut consister en une simple corrélation statistique, une loi scientifique, un mécanisme causal, etc. Ces différentes expressions de la relation entre les variables du système s'appuient généralement sur les connaissances scientifiques disponibles et constituent chaque fois un modèle, plus ou moins riche, plus ou moins fiable, plus ou moins réaliste etc., du système considéré.

L'identification des actions possibles sur un système suppose donc une modélisation de celui-ci en termes de variables susceptibles d'être manipulées (par opposition à celles sur lesquelles on ne pourrait agir) mais donc nécessairement aussi une connaissance, même superficielle ou approximative, de l'étendue des valeurs possibles de ces variables en sorte de déterminer celles que l'on voudrait voir se réaliser. C'est ici qu'intervient la distinction entre la science pure et la

science appliquée, ou technologie : la première construit des modèles des phénomènes en vue de leur connaissance (description, explication, prévision), la seconde en vue de leur contrôle, de leur manipulation.

Les modèles de la science appliquée :

- comprennent donc, implicitement au moins, la distinction entre les variables de commande et les autres variables, distinction qui n'est pas nécessairement pertinente pour la recherche fondamentale ;
- s'appuient (ou devraient s'appuyer) sur les modèles développés dans le cadre de la recherche fondamentale – s'ils existent – pour représenter les relations entre les variables de commande et les autres variables ainsi que le comportement global du système ;
- sont d'autant plus efficaces que les modèles scientifiques sur lesquels ils reposent sont puissants³.

Dans le cadre de cette recherche, nous nous concentrons principalement sur les modèles appliqués utilisés dans le cadre du processus de prise de décision en matière énergétique et d'aménagement du territoire pour informer le décideur sur les variables de commande sur lesquelles il lui est possible d'agir et sur les conséquences des modifications apportées à ces variables sur le comportement du système en général envisagé en référence à ses objectifs.

2.3.1 Modèles et systèmes

La notion qui rend le mieux compte de ce à quoi se réfèrent les modèles en général est celle de système. Elle est suffisamment générale pour s'appliquer à tous les objets dont la science pure comme la science appliquée ont à connaître⁴ sans être, pour autant, dépourvue de contenu. En effet, parler de systèmes, c'est mettre d'emblée l'accent sur le fait que les objets de la connaissance et de l'action sont toujours plus ou moins :

1. **composés** (composés d'une pluralité d'éléments plus ou moins complexes, susceptibles la plupart du temps d'une approche également en terme de système) ;
2. **structurés** (les éléments sont en interaction, celles-ci manifestant une certaine permanence ou stabilité) ;
3. placés dans un **environnement** lui-même composé de systèmes de différentes natures avec lequel elle échange de la matière, de l'énergie et de l'information ;
4. et généralement emboîtés dans une **hiérarchie** allant du plus simple au plus complexe.

³ « Pour établir un modèle d'un objet O, il faut extirper de l'ensemble des propriétés... que possède O, un certain nombre de propriétés...qui sont vérifiées pour tous les objets de même nature que O. Le modèle est d'autant plus puissant que la classe d'objets considérée est plus large. » (Bruter, 1982 : 93).

⁴ C'est ainsi que M.Bunge a pu construire toute une philosophie scientifique comprenant une ontologie, une épistémologie et une éthique basées sur la notion de système, et cela sans tomber dans une forme de mysticisme holiste mais en s'appuyant en permanence sur les théories et les résultats des sciences naturelles et sociales. Cf. M.Bunge (1977...1987).

La théorie générale des systèmes, qui traite des propriétés générales des systèmes, c'est-à-dire des propriétés qui s'appliquent aux objets concrets en tant que systèmes quelle que soit leur nature réelle (systèmes physiques, chimiques, biologiques, sociaux, techniques, etc.) introduit des distinctions entre systèmes selon différents critères :

- la relation avec leur environnement : degré d'ouverture (système fermé, ouvert, semi-fermé) ;
- la structure des relations entre les composantes (décomposable, quasi-décomposable, hiérarchiques, etc.) ;
- leurs propriétés dynamiques (stables, adaptatifs, chaotiques, etc.).

2.3.2 Types de modèles

Un modèle constitue donc une représentation simplifiée d'un système, élaborée en vue d'un certain objectif (prévision, compréhension, manipulation, etc.). Il existe évidemment de nombreuses formes de représentation : graphique (une carte routière, un diagramme), analogique (une maquette), linguistique, mathématique.

Si les représentations linguistiques et mathématiques sont les plus fréquentes dans le domaine scientifique et technologique, les modes graphiques et analogiques peuvent jouer un rôle non négligeable dans certains domaines d'application comme la planification urbaine et l'aménagement du territoire : en témoigne le développement des systèmes d'informations géographiques.

Les représentations fondées sur le langage, qu'il soit naturel ou formel, se composent d'un certain nombre de variables liées entre elles par des relations strictement définies. La nature des variables qui composent le modèle et celle des relations qui les relient engendrent de nombreuses possibilités de classification des modèles.

Les *systèmes experts*, par exemple, sont des modèles qui relient entre elles des variables linguistiques au moyen de règles du type « si...alors ». Par exemple :

« **Si** le demandeur de crédit est salarié du secteur public **et** qu'il est marié **alors** le risque de non-paiement est faible ».

Les variables sont ici : 'demandeur' et 'risque', les attributs sont : 'salarié du secteur public', 'marié' et 'faible'. Les deux premiers attributs sont de type nominal, l'attribut 'faible' est ordinal.

Même si le recours à ces formes linguistiques de modélisation devient de plus en plus fréquent, la grande majorité des modèles reste formulée en langage mathématique. Les variables y sont alors *discrètes ou continues* et les relations entre elles prennent une forme fonctionnelle (équations). Ces relations peuvent être *linéaires ou non*, permettant, dans le premier cas un traitement *analytique* du modèle, nécessitant dans l'autre le recours à des méthodes de résolution numérique ou de *simulation* ; elles peuvent encore être strictement *déterministes* ou *stochastiques*, incluant alors un terme aléatoire ou s'exprimant sous forme de distributions de probabilités, etc.

Un critère essentiel de classification des modèles est le rôle tenu par le temps : le modèle sera statique si le temps n'y joue aucun rôle, dynamique si, au contraire, les variables comportent une dimension temporelle⁵. Le temps devient donc un attribut supplémentaire des variables ou une variable à part entière. Il peut lui-aussi être représenté sous forme discrète ou sous forme continue.

Pour les besoins de l'étude en cours, les critères les plus pertinents sont :

1. L'objectif du modèle : scientifique, normatif, pragmatique. Même si dans le contexte de l'aide à la décision, ce sont les modèles à vocation pragmatique qui nous retiendront, les deux autres type des modèles ne doivent pas être totalement ignorés. En effet, les modèles pragmatiques s'appuient toujours peu ou prou sur des modèles scientifiques qui leur servent de support (par exemple : nombre de modèles d'aide à la décision en matière de transports s'appuient sur plusieurs modèles scientifiques tels que, par exemple, un modèle économique d'équilibre du marché immobilier, un modèle gravitationnel de l'attractivité en fonction de la distance qui trouve son origine dans les équations de Newton, un modèle input-output des échanges interrégionaux etc.) dont ils partagent les postulats, les *a priori* et les limites. Quant aux modèles normatifs, dans la mesure où ils ont pour objectif la conception d'un système optimal, de référence, etc., leur rôle dans la prise de décision peut être intéressant ;
2. Le caractère disciplinaire, interdisciplinaire ou transdisciplinaire du modèle ;
3. Le caractère déterministe ou stochastique du modèle qui détermine en grande partie la possibilité de prendre en compte (d'admettre même) les incertitudes ;
4. Son niveau d'agrégation (macro *vs.* micro) qui est révélateur de la part faite à la diversité des comportements, des populations, des situations ;
5. Son rapport au temps : statique *vs.* dynamique, de court, moyen ou long terme.

Nous revenons plus en détail sur ces distinctions ainsi que sur d'autres couples oppositionnels fréquemment utilisés à propos des modèles dans le chapitre suivant.

2.4 Quelques oppositions traditionnelles

Préalablement à une analyse par classe de modèle, réalisée dans le chapitre suivant, il peut être intéressant de mettre en exergue les oppositions couramment rencontrées dans la littérature. Cette étape préliminaire permettra d'illustrer deux idées : d'une part, l'irréductibilité de certaines approches ou paradigmes ; d'autre part, la complémentarité de certaines de ces approches.

Quiconque s'intéresse à ce que produisent les modèles appliqués aura rencontré, un jour ou l'autre, les oppositions suivantes :

1. Statique *versus* dynamique
2. Micro *versus* macro

⁵ Notons que le temps peut intervenir de façon active ou passive. Dans le premier cas, les relations entre variables sont elles-mêmes susceptibles de varier avec le temps.

-
3. Bottom up *versus* top down
 4. Optimisation *versus* simulation
 5. Equilibre partiel *versus* équilibre général

Dans le champ du développement durable, on privilégiera les modèles suffisamment complexes pour pouvoir rendre compte de systèmes réels dont on sait qu'ils sont eux-mêmes complexes, c'est-à-dire riches en termes de variables et de relations entre elles, capables d'exprimer des relations non-linéaires et exprimant le jeu des forces et des mécanismes qui sont à l'œuvre dans l'évolution temporelle des systèmes réels.

2.4.1 *Statique vs dynamique*

Un critère essentiel de classification des modèles est le rôle tenu par le *temps* : le modèle sera statique si le temps n'y joue aucun rôle, dynamique si, au contraire, les variables comportent une dimension temporelle⁶. Le temps devient donc un attribut supplémentaire des variables ou une variable à part entière. Il peut lui-aussi être représenté sous forme discrète ou sous forme continue. Si l'état d'une variable à un moment donné s'explique, totalement ou partiellement, par son état à un ou plusieurs autres moments précédents ($x_t = f(x_{t-n})$), le modèle sera considéré comme dynamique. Ainsi, lorsqu'un modèle est constitué d'un réseau de variables considérés comme des stocks liés entre eux par des flux, comme dans le cas de modèles de type « system dynamics », on se trouve indubitablement devant un système dynamique puisque le stock est clairement l'équivalent de l'intégrale (au sens mathématique) à un instant donné des flux d'entrée et de sortie qui l'ont affecté pendant un intervalle de temps (une durée) considérée.

Cependant, le qualificatif de dynamique peut être compris dans un autre sens, plus conforme d'ailleurs à l'étymologie puisque, en grec, le substantif *dunamein* désigne la force agissante. Dans cette acception, un modèle sera dynamique dès lors qu'il contient un mécanisme capable de rendre compte (d'expliquer) le changement du système représenté au cours du temps. Un philosophe des sciences comme Bunge réserve d'ailleurs le qualificatif de dynamique à ce type de modèles. En revanche, il qualifie de *cinétiques* les modèles qui représentent le comportement d'un système au cours du temps sans faire appel à un mécanisme générateur, par exemple de type causal. Ainsi, les modèles de séries chronologiques tels que les modèles Box et Jenkins ou ARIMA sont, pour Bunge, des modèles cinétiques et non dynamiques car ils ne comportent aucune représentation du ou des mécanismes qui expliquent les changements d'état du système au cours du temps.

Dans le champ du développement durable, on privilégiera les modèles suffisamment complexes pour pouvoir rendre compte de systèmes réels dont on sait qu'ils sont eux-mêmes complexes, c'est-à-dire riches en termes de variables et de relations entre elles, capables d'exprimer des relations non-linéaires et exprimant le jeu des forces et des mécanismes qui sont à l'œuvre dans l'évolution temporelle des systèmes réels.

⁶ Notons que le temps peut intervenir de façon active ou passive. Dans le premier cas, les relations entre variables sont elles-mêmes susceptibles de varier avec le temps. Les modèles du deuxième type sont dits stationnaires ou « time-invariant »

2.4.2 *Micro versus macro*

Une approche micro se caractérise par deux éléments : d'une part le recours à des données très détaillées, *a priori* individuelles, d'autre part la modélisation des comportements individuels. Le premier élément est le plus intuitif mais il est ambigu : analyser le secteur du verre plat relève-t-il de l'analyse micro ? Non, dans le sens où ce secteur est lui-même l'agrégation d'entreprises individuelles hétérogènes ; oui, si on reconnaît que le niveau d'analyse est très désagrégé. Le véritable niveau micro est celui où il n'y a pas d'agrégation des données et où on a identifié la bonne entité décisionnelle (l'unité de production, le consommateur...).

Cela rejoint alors le second élément : l'analyse micro s'intéresse aux comportements individuels c'est-à-dire qu'elle se réfère à l'entité décisionnelle élémentaire (la firme, le consommateur individuel, le ménage...). La théorie microéconomique résout cette difficulté de deux manières : soit elle raisonne sur un agent unique mais supposé *représentatif* (il existe donc éventuellement une multitude d'agents, mais ils sont tous identiques), soit elle pose qu'il existe un *contium* d'agents hétérogènes.

L'approche macro, par opposition, travaille sur des données qui sont des agrégats (même si le niveau est fin, comme un tableau entrées-sorties à 60 branches). Par exemple, la macroéconomie s'intéresse à la régulation de variables telles que le déficit public, la balance des paiements, le chômage, l'inflation, autant de phénomènes d'essence macroéconomique, c'est-à-dire agrégés, qui reflètent l'évolution de la structure générale du système économique.

Outre ce niveau d'agrégation, l'approche macro va tenter d'appréhender le système dans son ensemble, ce qui n'est pas nécessairement un objectif de l'approche micro qui va généralement concentrer son attention sur certaines parties du système (par exemple, les secteurs d'activité les plus polluants) en excluant les autres de l'analyse. Du point de vue de l'analyse des comportements, l'approche macro raisonne généralement sur des phénomènes globaux.

2.4.3 *Bottom up versus top down*

Cette opposition, classique dans les questions énergétiques durant les années '90, renvoie à la différence dans les modes de résolution et d'écriture des modèles. Cette opposition est cependant à la fois partiellement fallacieuse et partiellement irréductible.

Un modèle *bottom up* est un modèle dans lequel l'information remonte, c'est-à-dire passe du niveau le plus désagrégé au niveau le plus agrégé. Un modèle décrivant le parc automobile par type de cylindrée, type de conducteur et type de carburant va évidemment agréger toutes ces données pour déterminer la consommation totale de carburant liée au transport individuel : l'information remonte. Un modèle d'optimisation va déterminer le parc de production énergétique qui minimise le coût total (cas du modèle Markal) : on a bien une structure ascendante. L'avantage d'une structure *bottom up* est qu'elle permet de rendre compte de changements structurels : il est possible de faire apparaître une technologie nouvelle ou d'en faire disparaître une obsolète : ce choc sera répercuté dans l'agrégat.

L'approche *top down* caractérise les modèles économiques (équilibre général ou macro-économétriques) : ils sont construits sur des données agrégées, ainsi qu'expliqué précédemment. La notion de « top down » renvoie au fait que les informations descendent du niveau le plus agrégé au niveau le plus désagrégé. Cette propriété est vraie pour des fonctions telles que la consommation privée ou le choix des facteurs de production, qu'il s'agisse de modèles macro-économétriques ou d'équilibre général d'ailleurs.

Considérons le cas de la fonction de consommation keynésienne : elle constitue une fonction macro-économique par essence ; une fois la consommation totale déterminée, on la désagrège entre plusieurs postes budgétaires (alimentation, bien durables, équipement, loisirs...) à l'aide de modèles d'allocation (AIDS par exemple). Néanmoins, si les quantités « descendent », les prix « remontent » dans un tel système : l'indice des prix à la consommation est l'agrégation des indices de prix des catégories les plus désagrégées pondérée par leur part dans la consommation totale : on voit bien que les volumes descendent tandis que les prix remontent. Une solution est trouvée lorsque les deux échanges d'informations deviennent cohérents. Un autre exemple peut être cité : le niveau du PIB, dans un modèle macroéconomique sectoriel (Hermès, Gem-E3, Scarlatti) est calculé comme la somme des valeurs ajoutées des secteurs. Chaque secteur est un système en soi, inter-agissant avec les autres secteurs et l'ensemble des agents, et le PIB, tout comme le taux de chômage, la dette publique ou l'inflation (et maints autres phénomènes macro) ne sont que l'agrégation de données plus fines. Un modèle *top down* ne se contente donc pas de désagréger.

Enfin, pour illustrer le fait que tout est question d'architecture de modélisation, le modèle Corelli qui modélise la consommation des ménages en Belgique est macroéconomique par les données macro qu'il utilise, même si celles-ci sont très désagrégées (42 catégories de consommations de biens et services) et vont jusqu'à la consommation de viandes par type de viande en unités physiques (kg par an et par habitant). Enfin, le modèle adopte une structure *bottom-up* : ce sont les consommations au niveau les plus désagrégé qui font l'objet d'une modélisation comportementale et d'estimations économétriques, les quantités calculées étant ensuite agrégées pour aboutir à la consommation totale ⁷.

2.4.4 Simulation versus optimisation

L'optimisation consiste à utiliser des algorithmes de recherche opérationnelle pour minimiser ou maximiser une fonction objectif donnée. Cette optimisation est réalisée compte tenu des contraintes imposées dans le système (par exemple, des contraintes de disponibilité des technologies ou des contraintes de capacité) et des hypothèses formulées sur les variables exogènes (par exemple, certains prix).

L'optimisation *centralisée* repose sur le fait qu'une fonction objectif *unique* à l'ensemble du système est considérée. Par exemple, le modèle Markal détermine les modes de production qui minimisent le coût total de production de l'ensemble du système énergétique⁸. Les deux caractéristiques principales sont que le modèle fonctionne en information parfaite (tous les prix et coûts ainsi que toutes les caractéristiques techniques sont parfaitement connues lors du calcul de minimisation) et qu'il n'y a pas de coûts d'ajustement ou de transaction. Ces deux hypothèses sont tenables pour autant que le système modélisé se situe sous la tutelle d'un centre de décision unique et centralisé, ce qui peut être le cas d'un groupe industriel (même à l'échelon international), mais pas d'un système énergétique localisé à l'échelon d'une nation ou d'un ensemble de nations et soumis aux décisions décentralisées d'acteurs concurrents.

⁷ Ce modèle Corelli a été développé par l'IDD dans le cadre d'un contrat de recherche du PADD-I des SSTC « Emissions de GES et flux de matières », en collaboration avec l'Institut wallon et le Vito, en 2000.

⁸ Voir : A. Seebregts, G. Goldstein, K. Smekens: "Energy/environmental Modeling with the Markal Family of Models", ETSAP, 2002.

On parle parfois, pour les modèles d'équilibre général calculable, d'optimisation *décentralisée* : ces modèles distinguent plusieurs agents, chacun cherchant à optimiser une fonction objectif individuelle (maximiser le niveau de bien-être pour les ménages, maximiser le profit pour les firmes) : les interdépendances entre ces agents sont celles qui transitent par les marchés, soit les modifications des conditions d'offre et de demande et leurs impacts sur les prix d'équilibre. Dans les modèles macro-économétriques, de nombreuses équations de comportement ne peuvent pas être considérées comme représentant un comportement optimisateur, ni du point de vue individuel (comme dans un modèle d'équilibre général calculable), ni du point de vue global (comme dans modèle d'optimisation centralisée). Par exemple, la fonction de consommation keynésienne ou la courbe de Phillips (voir ci-dessous l'analyse précise des caractéristiques des modèles).

La simulation s'oppose à l'optimisation dans la mesure où elle ne correspond qu'à la résolution numérique d'un système d'équations (qui peuvent simultanées ou non) alors que l'optimisation recherche la solution à un problème borné sous certaines contraintes. L'optimisation a donc une composante *normative* puisqu'elle fournit *la meilleure solution au problème posé (la fonction objectif) compte tenu des contraintes données*, sans préjuger du réalisme de cette solution.

Enfin, l'approche par simulation cherche davantage à reproduire le comportement du système, à voir de quelle manière il est susceptible de réagir, puis à utiliser le modèle pour tester des scénarios (l'approche « what... if ? »).

2.4.5 *Equilibre partiel versus équilibre général*

Cette opposition est moins générique que les précédentes dans le sens où elle repose davantage sur une approche économique des phénomènes *via* le concept de marché. L'équilibre partiel signifie qu'un seul marché est étudié, isolément des autres. Cela implique deux choses : d'une part, qu'une modification des conditions d'offre et de demande sur ce marché ne modifie pas les autres marchés et, d'autre part, qu'une modification des conditions sur les autres marchés n'influence pas le marché étudié. On raisonne donc « toutes choses égales par ailleurs ».

Par exemple, on peut s'intéresser à la production d'énergie sans modéliser les réactions de la demande à une modification des prix de vente. L'avantage d'une analyse en équilibre partiel est qu'elle peut se focaliser sur un marché donné avec d'autant plus de précision qu'elle ignore les autres ; l'on gagne donc généralement en détail (par exemple par un niveau de désagrégation plus élevé).

L'inconvénient de l'analyse en équilibre partiel est que beaucoup d'éléments intervenant sur le marché modélisé demeurent exogènes, notamment l'un des côtés du marché (soit la demande, soit l'offre) ainsi que de nombreux prix. L'approche en équilibre général cherche au contraire à prendre en compte l'ensemble des rétroactions entre l'ensemble des marchés, aussi bien en terme de volumes que de prix. Par exemple, la réaction du marché du travail lorsque l'on introduit une politique de « double dividende » taxation du CO₂ et réduction des charges patronales). Autre exemple, tenir compte des réactions des marchés énergétiques lorsqu'une politique Kyoto est introduite à l'échelon des pays de l'Annexe 1. Une approche qui tente de tenir compte de l'ensemble des rétroactions existantes entre les variables réduit d'autant le domaine de l'exogène dans le modèle, c'est-à-dire le nombre de variables exogènes par rapport au nombre de variables endogènes dans le modèle.

2.5 Critères pour l'aide à la décision en matière de développement durable

Il doit exister une correspondance étroite entre les caractéristiques du développement durable comme objectif, comme incarnation de certaines valeurs et les exigences épistémologiques adressées aux outils scientifiques conçus pour l'aborder. Ainsi, le premier Rapport fédéral sur le Développement Durable⁹ distingue-t-il 5 critères d'actions de développement durable : une conscience planétaire, une vision à long terme, une intégration des composantes, la reconnaissance des incertitudes scientifiques, une approche participative et responsable. Nos propres critères sont très proches de ceux-ci. Deux d'entre eux sont en fait identiques : la reconnaissance des incertitudes, l'approche participative. Les trois autres constituent soit une interprétation soit une spécification des critères du Bureau fédéral du Plan. Ainsi, la conscience planétaire s'interprète-t-elle en termes de modélisation comme la capacité à prendre en compte les interactions entre niveaux différents, qu'ils soient institutionnels et administratifs ou ontologiques (on parle ici de structure « feuilletée » de la réalité). La vision à long terme est interprétée comme la capacité à prendre en considération aussi bien le bien-être des générations actuelles que celui des générations futures. On verra que la vision à long terme n'est une condition ni nécessaire ni suffisante pour ce faire. Quant à l'intégration des composantes que le Bureau fédéral du Plan présente comme le fait que « la protection de l'environnement doit faire partie intégrante du processus de développement et ne peut être considérée isolément », nous lui donnons ici une interprétation épistémologique en termes d'interdisciplinarité.

Ces critères trouvent leur justification dans l'analyse de ce qu'on pourrait appeler les « problèmes de développement durable ». Qu'y a-t-il de commun entre le réchauffement climatique, la problématique des OGM, l'épuisement des populations de poissons, etc., pour ne citer que quelques uns des principaux problèmes de développement durable ? Dans chaque cas, l'on trouve :

- une interaction entre activités humaines et processus naturels. Par exemple, les émissions de GES dues à l'activité agricole et industrielle, aux transports, etc., se concentrent dans l'atmosphère et renforcent un processus naturel, l'effet de serre, qui conduit au réchauffement de la planète ;
- l'existence de délais parfois très longs entre causes et conséquences. Par exemple, l'augmentation de l'effet de serre ne se produit qu'après plusieurs décennies d'accumulation de GES dans l'atmosphère. Quant aux conséquences du réchauffement sur le niveau des eaux, les différents climats, etc., elles se feront sentir, elles-aussi, à long terme. Il y a donc un intervalle temporel long entre la cause et son effet. On peut alors parler ici d'*externalités temporelles* dans la mesure où ce ne sont pas les générations qui ont le plus contribué à l'existence du problème qui en subiront les conséquences néfastes ;
- le caractère planétaire du phénomène ou de façon plus générale, l'existence d'*externalités géographiques*. Dans le cas du réchauffement climatique, outre le fait que ce ne sont pas les générations qui auront causé le dommage qui en subiront les effets, ce ne sont pas non plus les populations responsables de la plus grande part du problème qui en seront le plus affectées. Dans le cas des OGM, les impacts environnementaux débordent largement les champs ensemencés en OGM et peuvent se propager à des distances considérables ;
- les incertitudes au sujet de l'ampleur réelle du problème, de ses causes précises, de ses conséquences probables. Dans le cas du réchauffement climatique, les incertitudes relatives à l'influence réelle des activités humaines sur le phénomène ont conduit à retarder de

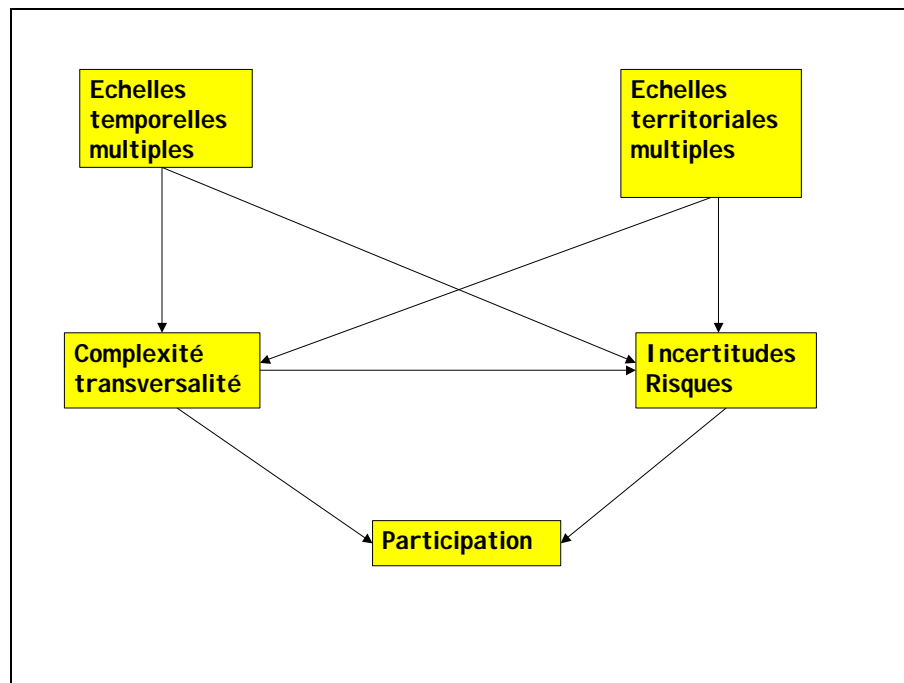
⁹ Bureau fédéral du Plan, 2000, « Sur la voie d'un développement durable ? », Bruxelles.

plusieurs dizaines d'années la prise de décision au niveau international. Ces incertitudes continuent à peser dans la problématique des OGM, justifiant une application rigoureuse du principe de précaution.

Le cinquième critère, celui de la participation des parties prenantes ne découle pas directement de l'analyse des problématiques de développement durable. Il s'impose à cause des incertitudes et des différentes formes d'externalités.

Le schéma ci-dessous illustre les interactions entre critères et la justification « instrumentale » de la participation. Nous parlons ici d'une justification « instrumentale », fondée sur les incertitudes et les complexités, pour la distinguer de la justification « normative » selon laquelle la participation n'a pas besoin d'autre justification qu'elle-même, étant un objectif en soi.

Schéma 2 Interactions entre les critères



On attendra donc des modèles d'aide à la décision en matière de développement durable qu'ils répondent aux cinq critères suivants : l'interdisciplinarité, la prise en compte des incertitudes, celle des effets à long terme, la possibilité d'articuler des niveaux différents (« glocalité ») et l'organisation de la participation des parties prenantes.

Les paragraphes qui suivent sont consacrés à une explication de ces cinq critères envisagés sous l'angle de la modélisation.

2.5.1 L'interdisciplinarité

L'interdisciplinarité est une exigence issue de la complexité du réel : « On pourrait dire que la problématique de l'interdisciplinarité est le reflet épistémologique de la complexité du réel... Or le complexe n'est pas réductible à la somme des éléments en lesquels on peut l'analyser ; il est la résultante de leurs interactions, sous l'égide de principes d'organisation qui en assurent la cohérence et l'efficacité. C'est dans cette perspective que l'interdisciplinarité acquiert véritablement toute sa signification » (Ladrière, 2001, p 19-20).

Nulle part la complexité du réel n'est plus évidente que dans le cas du développement durable où quelle que soit la définition que l'on en adopte, on se trouve confronté aux interactions complexes entre phénomènes relevant de plusieurs disciplines des sciences naturelles et des sciences sociales et humaines. L'analyse des causes et des conséquences du réchauffement climatique est emblématique à cet égard.

Il n'est cependant pas aisé de définir l'interdisciplinarité de façon opérationnelle et d'en donner des critères ou des indicateurs.

L. Apostel est sans doute le philosophe des sciences qui s'est le plus penché sur l'interdisciplinarité. Dans son dernier ouvrage (Apostel, 2000)¹⁰, édité à titre posthume, il distingue différentes formes d'interdisciplinarité : classiques théoriques, classiques métathéoriques et nouvelles. L'interdisciplinarité théorique classique est définie comme suit :

« Soit T_1 et T_2 deux disciplines traitant respectivement d'une classe d'objets $O_1 = \{o_{11}, \dots, o_{1n}\}$ et $O_2 = \{o_{21}, \dots, o_{2n}\}$. Soit un objet C appartenant simultanément à la classe O_1 et O_2 . T_1 contient des énoncés sur les prédicats P_1 et les relations R_1 de C . T_2 contient des énoncés sur des prédicats P_2 et des relations R_2 de C . « Nous pouvons former l'union des principes de T_1 et T_2 et envisager les conséquences de cette union. Il se peut que ces conséquences « communes » contiennent des vérités nouvelles qui ne soient déductibles ni de T_1 ni de T_2 isolément. Si ces conséquences neuves et fécondes concernent C , alors on dira que l'union offre une théorie interdisciplinaire de C . Il se peut aussi que cette union ne donne pas plus qu'une description plus complète de C , par juxtaposition des résultats acquis en T_1 et en T_2 , mais jusqu'alors non mis ensemble. Dans ce cas, on dira que l'union offre une théorie multi ou pluridisciplinaire de C . » (Apostel, 2001, 50-51).

Il s'agit là d'une conception purement logique de l'interdisciplinarité ; la science y étant envisagée comme un ensemble structuré de propositions liées entre elles par des relations d'implication logique. On pourrait aussi bien, dit Apostel, donner une définition méthodologique de l'interdisciplinarité. Dans ce cas, ce serait l'union des procédures d'observation, d'expérimentation – et ajouterions-nous, de modélisation – de T_1 et de T_2 qui pourrait faire émerger une connaissance nouvelle.

Par ailleurs, Apostel se situe ici dans le champ des interdisciplinarités théoriques. Mais il existe un niveau plus élevé d'interdisciplinarité, situé au niveau « métathéorique ». Cette interdisciplinarité repose sur la mise en évidence d'une identité de structure (un isomorphisme) entre T_1 et T_2 . C'est le cas par exemple, en physique, des équations de l'électrostatique et de l'hydrostatique. La mise en évidence de ces isomorphismes n'a pas de valeur explicative mais permet de « considérer les sciences comme 'organisées' par une multiplicité restreinte de

¹⁰ Apostel, L., 2000, *Population, développement, environnement. Pour des regards interdisciplinaires*, Louvain-La-Neuve, Paris : Bruylant-Academia, L'Harmattan.

‘thèmes structurels’ et d’appliquer les résultats mathématiques connus concernant ces structures à tous les cas particuliers où ils se manifestent. » (51-52).

On peut aussi considérer T_1 et T_2 comme déductibles toutes deux (ou comme cas particulier) d’une troisième théorie plus générale, T_3 . Dans ce cas, T_3 peut être considéré comme une théorie transdisciplinaire. « Un exemple de T_3 serait la théorie des systèmes. Elle part de l’hypothèse que tous les objets réels sont des systèmes (c’est-à-dire des multiplicités d’éléments en interaction, préservant certaines relations constantes dans des conditions données), caractérisées par des frontières ou bords, des environnements, des sous-systèmes et de super-systèmes, des conditions d’équilibre et de stabilité, etc. On peut obtenir toutes les sciences particulières en donnant des définitions particulières aux notions de base qu’on vient de nommer... » (Apostel, 2000, 52). C’est d’ailleurs ce à quoi se sont attachés plusieurs philosophes et notamment M. Bunge dans « A Treatise on Basic Philosophy ».

Pour Apostel, toutes ces conceptions de l’interdisciplinarité peuvent être considérées comme classiques parce qu’elles supposent une conception classique de la science. Cependant, cette dernière serait, selon lui, progressivement remplacée par une nouvelle conception des sciences comme des entreprises collectives historiquement et sociologiquement situées, autrement dit comme « systèmes d’actions collectives en devenir ». L’interdisciplinarité propre à ces systèmes d’actions serait :

« nécessairement une forme de l’interaction de pareils systèmes. Considérons deux systèmes S_1 et S_2 , immergés tous les deux dans un même environnement E . Nous pouvons expliquer partiellement le devenir de S_1 à partir de ses interactions internes (il en va de même pour S_2). Toutefois, dans les deux cas, il y a l’influence globale de l’environnement (contenant l’autre système et beaucoup d’autres choses). Cette influence globale n’intervient que comme élément aléatoire perturbateur, ou comme bruit de fond constant. Il se peut maintenant que, si nous formons un système complexe ($S_1 + S_2$) dont nous étudions dans le détail les réactions internes, tel qu’il est immergé dans l’environnement $E - (S_1 + S_2)$, nous arrivions à expliquer une beaucoup plus grande part des propriétés de S_1 et S_2 qu’en les traitant isolément. Nous pourrions qualifier pareille étude d’interdisciplinaire » (Apostel, 2000, 54).

Un autre exemple d’interdisciplinarité nouvelle serait l’adoption par une discipline dont le paradigme dominant est épuisé d’un paradigme issu d’une autre discipline, les deux disciplines restant distinctes par ailleurs. Un exemple serait l’adoption du paradigme évolutionniste issu de la biologie en économie.

Comment traduire ces distinctions en termes de modèles pour l’aide à la décision ? Si on accepte de considérer comme pluri ou multi-disciplinaires les modèles qui mettent en œuvre des connaissances et des modèles théoriques issus de différentes disciplines, on demandera aux modèles interdisciplinaires une condition supplémentaire : à savoir qu’il y ait des interactions entre les variables d’état relevant de ces disciplines différentes. Autrement dit, pour qu’un modèle soit authentiquement interdisciplinaire, on exigera que les variables relevant de la discipline S_1 soient influencées par celles relevant de la discipline S_2 et qu’en retour celles-ci influent sur celles-là. Ainsi, c’est l’existence de feedbacks entre variables qui constituerait le critère déterminant. Il nous semble que cette définition constitue une traduction fidèle de l’interdisciplinarité « nouvelle » telle que définie par Apostel. Le système constitué de $S_1 + S_2$ doit effectivement être un système complexe, ce qui se traduit, nous semble-t-il, par l’existence de feedbacks entre les éléments de S_1 et de S_2 . On pourrait aussi retenir un critère pragmatique qui serait celui-ci : un modèle est authentiquement interdisciplinaire ssi (si et seulement si) sa construction, son utilisation (construction de scénarios) et l’interprétation de ses résultats exigent un véritable dialogue interdisciplinaire.

Suivant encore en cela les suggestions de L. Apostel, on réservera la qualification de transdisciplinaire aux modèles qui ne s'appuient pas sur des disciplines particulières mais sur ce qu'on pourrait appeler des « méta-théories ». On a vu plus haut que la théorie des systèmes en constitue l'exemple le plus achevé. En fait, il ne s'agit pas d'une science unifiée mais d'une constellation de théories regroupées sous des appellations telles que « systémique », « théorie générale des systèmes », « sciences de la complexité », etc. En effet : « The discipline that purports to develop such a unified approach is often called 'general system theory'...Paradoxically enough, this is not a single theory but a whole set of theories – automata theory, linear system theory, control theory, network theory, general Lagrangian dynamics, etc. – unified by a philosophical framework. We shall call *systemics* this set of theories that focus on the structural characteristics of systems and can therefore cross the largely artificial barriers between the disciplines » (Bunge, 1979 : 1).

La systémique n'est peut-être pas la seule théorie transdisciplinaire disponible dans le champ scientifique. Il faudrait peut-être s'interroger sur l'apport éventuel d'autres théories générales comme la théorie bayésienne des probabilités ou la théorie des réseaux. En revanche, on ne considérera pas la logique floue et ses avatars comme une théorie transdisciplinaire au même titre que la théorie des systèmes, par exemple. Ce qu'on appelle la théorie des systèmes flous (« Fuzzy System theory ») n'est pas une construction originale mais une traduction de la théorie des systèmes ordinaires en termes de variables et de relations floues. Il en va de même pour toutes les applications de la logique floue.

2.5.2 *L'incertitude*

Le deuxième critère est celui de la gestion de l'incertitude. Les différentes formes d'incertitude auxquelles on se trouve exposé dans tout problème de développement durable ont pour origine deux grandes sources (Rotmans et van Asselt, 2000¹¹) : la variabilité intrinsèque du réel, d'une part, et les limites des connaissances d'autre part. L'incertitude est donc à la fois de nature ontologique et de nature épistémique. L'existence d'une variabilité ontologique signifie que, même en cas d'information « parfaite », il peut rester une incertitude irréductible. Dans certains cas même, une réduction de l'incertitude épistémique peut conduire à une augmentation globale de l'incertitude en mettant en évidence une variabilité ontologique non perçue jusque là.

Dans le cadre de la modélisation, on distinguera trois grandes formes d'incertitude épistémologique :

1. l'incertitude sur les véritables valeurs des paramètres, des conditions initiales, etc., bref des différentes données quantitatives ;
2. l'incertitude sur la structure du modèle, les relations entre variables, les formes fonctionnelles, les algorithmes ;
3. l'incertitude sur la complétude (clôture) du modèle : le modèle prend-il en compte les bonnes variables, ne laisse-t-il pas à l'extérieur (input ou environnement) des variables cruciales, etc.

Les techniques telles que l'analyse de sensibilité, l'analyse bayésienne ou la méthode des scénarios permettent de réduire, de façon plus ou moins satisfaisante, les incertitudes liées aux

¹¹ Rotmans, J. et M.van Asselt, 2000, "Uncertainty Management in Integrated Assessment Modeling : Towards a Pluralistic Approach", International Centre for Integrative Studies, Maastricht.

quantités mises en jeu (paramètres, données initiales). La première consiste en l'étude statistique de l'impact des variations des valeurs des paramètres, données initiales etc., sur les résultats du modèle. L'analyse bayésienne consiste à attribuer aux différents paramètres ou autres quantités une distribution de probabilité plutôt qu'une valeur unique de façon à rendre compte du degré confiance ou d'incertitude du modélisateur à propos de ces valeurs. Ces distributions sont alors propagées à travers tout le modèle si bien que les sorties du modèle sont-elles aussi exprimées sous forme de distributions de probabilités. Quant à la notion de scénario telle qu'elle est comprise dans la méthode des scénarios, elle désigne un jeu complet d'hypothèses simultanées sur un ensemble de paramètres et doté d'une certaine cohérence. Contrairement à l'analyse de sensibilité qui analyse les résultats paramètres par paramètres, la méthode des scénarios compare les résultats obtenus sous l'effet de différents paquets d'hypothèses. Chacune de ces méthodes a ses avantages et ses inconvénients mais toutes les trois sont évidemment limitées aux incertitudes du premier type, celles qui sont liées aux données et aux paramètres. Elles sont impuissantes contre les incertitudes relatives à la structure du modèle et *a fortiori* quant à son adéquation et sa complétude.

Souvent, les équations qui relient les variables les unes aux autres supposent une relation linéaire entre la ou les variables dépendantes et les variables indépendantes, ou une relation linéaire entre les paramètres. Dans bien des cas, l'adoption d'une forme linéaire ne se justifie que pour des raisons techniques, principalement parce qu'elle permet une résolution plus aisée du système. En réalité, bien des relations sont non-linéaires avec des effets de seuils, des discontinuités, etc. Or, les outils d'estimations et d'identification des modèles sont le plus souvent inadaptés à des situations semblables. On préfère donc souvent faire l'impasse sur ces non-linéarités quitte à travestir parfois gravement la dynamique réelle des systèmes considérés.

2.5.3 La prise en compte du long terme

Les prévisions sur l'évolution du changement climatique et la mise en relief de ses conséquences probables exigent de pouvoir se projeter dans un avenir qui se compte non pas seulement en années mais en décennies. Il en va de même pour de nombreux autres phénomènes dont l'incidence sur le bien-être des générations futures peut être considérable. Que l'on songe par exemple à la radioactivité des déchets nucléaires et donc aux conséquences futures des choix effectués aujourd'hui en matière de traitement de ces déchets. L'idée même de développement suppose un processus temporel, une évolution, un changement contrôlé et orienté. Les notions de stabilité, d'évolution, de changement implicites derrière cette idée de développement et utilisées en permanence aussi bien dans la vie quotidienne que dans le discours scientifique font implicitement référence à une échelle temporelle à l'aune de laquelle les changements sont considérés comme significatifs ou non. Le problème est que ces échelles temporelles varient d'une science à l'autre (et, du reste, aussi d'une culture à l'autre.) Court terme et long terme n'ont pas du tout le même sens en économie, en biologie, en climatologie, en anthropologie. Cette a-synchronie est une des difficultés majeures de la recherche interdisciplinaire.

Même en restant dans le cadre d'une seule discipline, Il est déjà difficile de tracer une ligne de démarcation entre ce qui relève du court terme et ce qui relève du long terme. Dans le contexte de l'étude des changements climatiques, l'anthropologue Jeffrey Dean (qui enseigne la dendrochronologie) propose, par exemple, de distinguer les phénomènes à changement rapide et les phénomènes à changement lent selon qu'ils se déroulent au sein d'une seule génération ou qu'ils impliquent plusieurs générations (Dean, 2000). La notion de génération est sans aucun doute un repère important dans la prise en compte de l'histoire et de la chronologie. Elle ne se limite d'ailleurs pas au domaine biologique ou démographique. En technologie et en économie, on parlera d'objets de première génération, de génération de capital productif, de la dernière

génération de tel ou tel modèle d'avions, etc. Les modèles dits « à générations imbriquées » sont en train de faire une percée importante en économie¹². Même si ce ne sont pas, à proprement parler, des modèles de long terme, ils permettent une prise en compte de la problématique de l'équité intergénérationnelle dans le cadre de l'économie du bien-être.

Une chose est certaine : les modèles devraient clairement indiquer quel est leur domaine de validité temporel. Celui-ci pourrait se définir comme le nombre de pas de simulation à partir duquel les résultats ne peuvent plus être considérés comme significatifs ou encore comme la durée que le modèle peut couvrir sans devenir incohérent ou inadapté. Il est rare que les modélisateurs effectuent ce genre de test et en rendent compte. On peut, à cet égard, souligner l'importance que les praticiens de la dynamique des systèmes attachent à l'évaluation de la robustesse de leurs modèles en les simulant sur de très longues durées (150, 200 ans parfois).

2.5.4 Glocalité (pour concilier globalité et localité)

Le changement climatique est l'un des meilleurs exemples de problématique *globale* : les politiques de réduction des émissions exigent un accord mondial, chaque pays bénéficiera d'une telle politique, mais aucun n'est incité, seul, à en supporter les coûts. Cette première caractéristique est commune à nombre de problématiques inhérentes au développement durable, et elle s'explique par la nature collective du bien en question. L'exemple précédent est utile pour illustrer la proposition suivante : c'est la nature collective d'une problématique sociétale qui lui confère son cachet « développement durable »¹³. Une question « locale » (c'est-à-dire définie entre un nombre restreint d'agents clairement identifiés) contribue peu à la problématique du développement durable, contrairement à une question « globale ». Mais cette différence ne se limite pas au nombre d'acteurs impliqués : elle renvoie surtout à la complexité de la mise en œuvre d'une politique efficace lorsque les échelons décisionnels impliqués sont *nombreux* et *disparates*. Autrement dit, ce critère renvoie au précepte *think globally, but act locally*. Les impacts globaux sont le résultat d'actions commises à l'échelon local, et c'est à chaque acteur qu'il revient d'adopter les comportements assurant un développement durable, à l'échelon qui est le sien, avec la fonction économique et sociale qui est la sienne (citoyen, consommateur, responsable à quelque échelon que ce soit dans une entreprise, dans une administration locale, régionale, nationale ou internationale...).

Le critère « global/lobal », ou « glocalité » pour oser un néologisme emprunté à Funtowicz et Ravetz (1990), ne se résume donc pas à une prise en considération de la dimension planétaire d'une problématique mais également à la prise en considération des interactions entre les différents niveaux décisionnels. Concrètement, cela recouvre deux notions : d'une part, pour un agent donné, les coûts et bénéfices de ses actions ne dépendent pas uniquement de ses propres actions (*via* l'existence d'externalités) et, d'autre part, l'interdépendance des processus décisionnels aux différents échelons qui les caractérisent. Le principe de subsidiarité est un bon exemple de solution actuelle pour gérer les problèmes inhérents à l'existence de niveaux décisionnels multiples.

En terme d'évaluation des politiques, cela implique une évaluation des impacts aux différentes échelons impliqués, et une prise en compte des savoirs et des enjeux à ces différents échelons.

¹² Pourtant leur origine n'est pas récente. Elle remonte au début de la seconde moitié du siècle passé avec les travaux de P. Samuelson sur le sujet.

¹³ Voir le concept d'externalité en économie publique.

Il est enfin à noter que ce critère de *glocalité* devient de plus en plus pertinent au fur et à mesure que l'échelon de temps s'allonge : certaines questions peuvent être locales à court terme mais devenir globales à long terme.

Assurément, ce critère représente le challenge méthodologique le plus délicat. Bien qu'il ne se réduise pas au problème de l'articulation entre approches micro et macro, ce critère, du point de vue méthodologique, s'en rapproche beaucoup. Aujourd'hui, cette articulation micro-macro demeure une question ouverte dans les sciences sociales (économie, géographie, sociologie) et les politiques de développement (Max-Neef, 1991). Le débat entre les approches *top down* et *bottom up* dans le domaine énergétique durant la décennie 90 (voir la synthèse faite par le WG-III de l'IPCC), débat non clos mais moins virulent aujourd'hui, constitue un bon exemple (Böhringer (1998) ou Koopmans et te Velde (2001) constituent deux exemples de contributions récentes au débat).

À notre connaissance, il existe peu d'expériences de construction de modèles hiérarchiques multi-niveaux. Le second rapport au Club de Rome (Mesarovic and Pestel, 1974) constitue une exception, à considérer, encore aujourd'hui, comme l'une des réalisations les plus ambitieuses et impressionnantes de ce qui demeure fondamentalement une approche *top down*. Le développement récent et rapide du paradigme multi-agents est prometteur à cet égard.

2.5.5 Participation des parties prenantes

La participation des parties prenantes (*stakeholders*) constitue une caractéristique importante pour une politique de développement durable. Ce critère est lié à la fois aux questions relatives à la « bonne gouvernance », mais aussi à un fonctionnement correct d'un système démocratique. Ce critère est d'autant plus crucial que le problème traité est global (implication de plusieurs échelons d'acteurs) ou incertain (prise de décision en incertitude). Il renvoie au fait que le point de vue des acteurs impliqués dans une politique doit être pris en considération, mais aussi qu'un rôle actif peut leur être attribué du fait de leur statut de détenteurs de « connaissances locales » peut-être méconnues à des échelons supérieurs. Enfin, l'efficacité d'une politique peut parfois être fortement influencée par la compréhension qu'ont les différentes parties prenantes de cette politique : expliquer le sens d'une mesure ou d'une politique relève donc également de ce critère.

2.5.6 Relations entre les cinq critères

On le voit, les cinq critères proposés ne sont pas indépendants les uns des autres. Au contraire, ils s'impliquent mutuellement. La matrice ci-dessous montre les relations qui existent entre ces critères à partir de la relation R qui signifie que « le critère i requiert la prise en compte du critère j ».

Cette relation met en lumière les interdépendances entre critères et révèle lequel ou lesquels impliquent de prendre en compte d'autres critères. Elle détermine donc les relations d'implication entre critères. La matrice est construite de la manière suivante : une croix dans la cellule (i,j) indique que la relation R s'applique entre ces deux critères.

Il n'est pas nécessaire de commenter toutes les cases de cette matrice. Néanmoins, à titre d'exemple, considérons la ligne du critère « long terme » : une prise en considération des aspects couverts par ce critère rend nécessaire de tenir compte, également, du critère d'interdisciplinarité car le long terme met en jeu les dis-synchronies éventuelles entre, par exemple, la démographie, l'écologie (résilience), la gestion des ressources naturelles, etc. Le

long terme rend nécessaire également d’appréhender les questions relatives à l’incertitude et au risque, simplement du fait que ces deux éléments deviennent de plus en plus importants au fur et à mesure que l’horizon de référence s’éloigne. Enfin, le critère de long terme exige de tenir compte des aspects locaux et globaux, car les domaines géographiques et décisionnels sur lesquels une politique est susceptible d’avoir des effets s’étendent avec l’horizon de temps. Par contre, il n’est pas « nécessaire » de prendre en considération le rôle des parties prenantes, à l’exception des générations futures, ce qui est déjà contenu dans le critère de long terme.

Tableau 3. Relations entre les critères

“Rend nécessaire”	Interdisciplinarité	Long-terme	Incertitude	Local / global	Participation
Interdisciplinarité		X			
Long-terme	X		X	X	
Incertitude	X				X
Local / global	X				
Participation	X			X	

L’analyse de cette matrice révèle des éléments intéressants. Les croix situées sous la diagonale révèlent les « critères moteurs », ceux qui tirent les autres, qui les rendent nécessaires. Les croix situées au-dessus de la diagonale identifient les critères qui sont « tirés » par d’autres critères, qui sont rendus nécessaires par l’usage d’un autre critère. On constate que :

- la prise en compte de l’interdisciplinarité constitue vraiment le cœur du développement durable : elle est nécessaire à la prise en compte de l’ensemble des autres critères ;
- tous les critères sans exception sont nécessaires à au moins un autre critère (il existe toujours une croix au-dessus de la diagonale) ;
- le critère du long terme est celui qui influence le plus grand nombre d’autres critères (on trouve trois croix au-dessus de la diagonale) ;
- tous les critères exercent une influence sur au moins un autre critère.

Si cette analyse montre que certains critères sont plus prégnants que d’autres, elle permet aussi de structurer les relations entre eux tout en montrant qu’ils sont tous inter-reliés dans une structure complexe. Autrement dit, énoncer que « tout est dans tout », comme il est d’usage en matière de développement durable, n’exclut pas de structurer ces interrelations, comme le fait cette matrice. Et l’on constate que, bien qu’ils constituent un système simultané, ces critères sont organisés selon une certaine structuration.

2.6 Formalisation des relations entre modèles, critères et problématiques

L’objet de l’étude consiste à mettre en évidence le degré d’adéquation d’outils scientifiques à l’analyse et la résolution de problèmes de développement durable. La démarche poursuivie consiste d’abord à dégager des critères généraux qui constituent, à nos yeux, la clé de cette adéquation. C’est ce qui vient d’être fait. Elle consiste ensuite à examiner dans quelle mesure

les différentes classes de modèles sont plus ou moins à même de rencontrer ces critères. Ce sera l'objet du chapitre prochain.

Ensuite, elle consistera à explorer de façon plus concrète cette adéquation en la mettant à l'épreuve sur deux thématiques, envisagées comme une collection de problématiques particulières entrecroisées. Les deux thématiques retenues sont l'énergie et l'aménagement du territoire. Ici, ce que l'on cherchera d'abord à mettre en évidence, c'est la pertinence des critères par rapport à chacune des problématiques qui constituent la thématique retenue. Schématiquement, on dira qu'une thématique relève d'autant plus du développement durable que les problématiques qui la composent mettent en jeu les cinq critères retenus. Cela posé, il sera alors possible de revenir sur les modèles en termes cette fois d'adéquation des classes ou paradigmes de modélisations aux thématiques que sont l'énergie et l'aménagement du territoire.

Cette mise en cohérence entre les analyses par critères, problématiques et classes de modèles est réalisée dans un cadre formalisé. Notre analyse s'effectue donc dans un espace tridimensionnel : dans cet espace, chaque point, c'est-à-dire chaque modèle concret comme DICE ou GEME3 par exemple, est identifié par ses coordonnées par rapport à un critère, une problématique et une classe de modèles. Procéder à une analyse dans deux dimensions seulement revient à considérer une partition de cet espace : c'est ce qui est réalisé lorsque nous analysons la capacité des modèles à tenir compte des critères, d'une part, et l'importance des critères dans l'évaluation des problématiques, d'autre part. Ces deux analyses bi-dimensionnelles sont formellement interdépendantes : elles représentent une analyse croisée entre les classes de modèles et les problématiques. Ces relations peuvent être représentées de manière formelle (mathématiquement) afin de déduire cette dernière dimension des deux précédentes. Le résultat pourra alors être analysé et les causes identifiées dans les deux analyses initiales. Ce qui rend possible ce retour, c'est l'existence d'une cohérence logique due à l'existence d'une relation commune entre les modèles et les critères d'une part, et entre les critères et les problèmes de l'autre. Cette relation que l'on appellera « Relation d'adéquation » qui lie les modèles et les critères ainsi que les critères et les problématiques est transitive et lie donc également les modèles et les problématiques. En effet, si \mathfrak{R} est transitive, alors de $a\mathfrak{R}b$ et $b\mathfrak{R}c$, on peut déduire que $a\mathfrak{R}c$.

Cependant, nous ne nous contenterons pas d'une relation purement binaire, telle que celles dont traite la logique booléenne «classique ». Il nous paraît intéressant d'essayer de quantifier cette relation, fut-ce de façon approximative afin d'obtenir des « degrés d'adéquation ». On se retrouve donc davantage dans le cadre d'une logique non-standard, comme la logique floue par exemple.

En logique floue voici comment le problème serait formalisé.

- soit M l'ensemble des modèles d'une thématique quelconque q (énergie, AT...)
- soit C l'ensemble des critères à prendre en compte pour le développement durable
- soit P l'ensemble des problématiques présentes dans la thématique q
- soit \mathfrak{R}_1 une relation (floue) définie sur l'ensemble $[M * C]$ telle que $\mu_{\mathfrak{R}_1}(m,c)$ avec :

$m \in M$ et $c \in C$ désigne le degré auquel le modèle m satisfait au critère c

Par exemple $\mu_{\mathfrak{R}_1}(m_1,c_2) = 0,66$ signifie que le modèle m_1 (par ex : macroéconométrie) satisfait au critère c_2 (par exemple, intergénéralité) au degré 0,66.

Soit \mathfrak{R}_2 une autre relation (floue) définie sur l'ensemble $[C * P]$ telle que $\mu_{\mathfrak{R}_2}(p,c)$ avec :

$p \in P$ et $c \in C$ désigne le degré auquel la problématique p exige la prise en compte du critère c

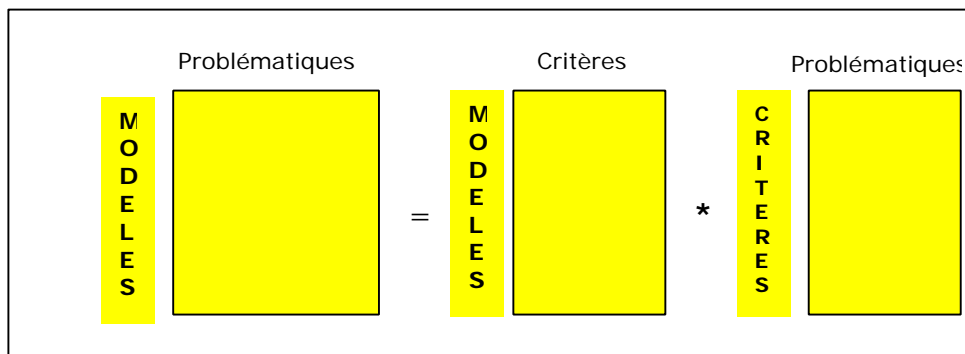
Par exemple $m\mathfrak{R}_2(p_1, c_2) = 0,38$ signifie que la problématique p_1 (par ex : le changement climatique) suppose la prise en compte du critère c_2 (l'intergénéralité) au degré 0,38.

Le problème est alors celui-ci : connaissant les relations \mathfrak{R}_1 et \mathfrak{R}_2 , trouver la relation \mathfrak{R}_3 définie sur l'ensemble $[M*P]$ sachant que :

$$\mathfrak{R}_3 \subset M * P = \mathfrak{R}_1 \subset M * C \circ \mathfrak{R}_2 \subset P * C$$

Voir le diagramme ci-dessous pour une illustration.

Schéma 3 Modèles-thématiques-critères : une mise en cohérence



L'équation $\mathfrak{R}_3 = \mathfrak{R}_1 \circ \mathfrak{R}_2$ s'appelle une *fuzzy relation equation* ou équation de relation floue, en français. La logique floue offre un certain nombre d'opérateurs (min-max, max-produit) permettant de résoudre l'équation. Un autre opérateur vient immédiatement à l'esprit : celui du produit matriciel. C'est celui que nous avons retenu ici sachant qu'il nous éloigne de l'orthodoxie de la logique floue et nous situe davantage dans une logique algébrique mais quelque peu « non-standard » dans la mesure où la métrique retenue pour le « rating » des modèles ne remplit toutes les propriétés arithmétiques voulues.

C'est sur cette métrique et sur le sens à donner aux cotations attribuées qu'il faut maintenant apporter quelques précisions.

2.6.1 L'interprétation des cotations

Les cotes retenues, que ce soit dans l'analyse des problématiques ou dans celle des classes de modèles, relèvent davantage de l'expérimentation que de valeurs *per se* : c'est davantage le fonctionnement de ce cadre d'analyse et sa capacité à dégager des pistes de recherche pour améliorer les modèles qui nous intéressent plutôt que les cotes en tant que telles. Celles-ci sont parfois le résultat de discussions entre chercheurs de l'IDD, parfois avec d'autres personnes extérieures, parfois avec le comité d'accompagnement du projet (comme cela a été le cas lors de la Table ronde consacrée à la thématique énergétique : se reporter au chapitre 5). Il est évident que ces cotes n'engagent que la responsabilité des auteurs de cette étude. En outre, il n'est pas inutile de rappeler que ces cotes n'ont pas pour objet d'identifier les « bons » et les « mauvais » modèles : une telle classification n'a aucun sens du point de vue de la

méthodologie de modélisation et serait une aberration compte tenu du fait que (i) les modèles ou classes de modèles considérés ici n'ont pas été *sui generis* conçus pour traiter du développement durable, et que (ii) chaque modèle est un compromis entre la spécialisation pour un domaine d'application et des sacrifices vis-à-vis d'autres domaines. On peut en donner deux illustrations :

- un modèle qui cherche à s'ancrer au mieux dans une approche microéconomique des problèmes énergétiques sacrifiera l'échelon global ou le recours à des procédures mathématiques ou des concepts théoriques abstraits (tels que l'optimisation, le concept de marché, etc.) ;
- un modèle cherchant à exploiter les techniques d'optimisation négligera souvent les approches issues de la théorie micro ou macroéconomique (imperfections de marchés, théorie des jeux, impacts socio-économiques et budgétaires...).

2.6.2 *Choix des métriques*

Les métriques utilisées sont conditionnées par le *mapping* matriciel qui est opéré, à savoir une multiplication (voir ci-dessous). D'autres *mapping* ont été testés (notamment l'opérateur *min-max*) mais ne se sont pas révélés supérieurs au produit matriciel avec les métriques retenues ici :

- matrice modèles / critères (*M.C*) : lorsqu'un modèle est incapable de tenir compte d'un critère, une cote négative lui est attribuée afin que cela constitue un handicap lors du produit matriciel (voir plus bas) ; lorsqu'il en tient compte, mais plus ou moins bien, une cote positive est attribuée ; afin que les distances soient les mêmes entre ces trois cotes, les valeurs suivantes ont été retenues : -0,5 / 0,5 / 1,5 ; il est évident que n'importe quel autre triplet respectant les deux propriétés précédentes pourrait faire l'affaire, les niveaux absolus n'ayant aucune signification ;
- matrice critères / problématiques (*C.P*) : la somme des cotes fournies par les membres du Comité d'accompagnement et les chercheurs de l'IDD a été retenue, ce qui entraîne des valeurs allant de 0 ('négligeable') à 6 ('très important'), chaque cote pouvant avoir une valeur individuelle de 0 ('négligeable'), 1 ('important') ou 2 ('très important'). Une cote de 6 ici signifie donc que les deux membres du Comité d'accompagnement ainsi que les chercheurs de l'IDD forment un consensus sur la cote maximale (voir le chapitre 3 pour davantage d'explications) ;
- ces deux métriques conviennent parfaitement au *mapping* retenu pour constituer la matrice modèles / problématiques (*M.P*) : la métrique *C.P* a été préservée car, associée par un produit matriciel à la matrice *M.C* qui contient des valeurs potentiellement négatives, elle entraîne la propriété suivante : lorsqu'une valeur négative dans *M.C* rencontre une valeur positive élevée dans la matrice *C.P*, cela signifie que la classe de modèle est incapable de tenir compte d'un critère pourtant crucial pour l'analyse de la problématique, et cela constitue donc un handicap fort pour cette classe de modèles. Par contre, lorsque qu'une cote négative dans *M.C* rencontre dans *C.P* une valeur faible, le handicap est moins important pour la classe de modèle. Inversement, lorsqu'une classe de modèles possède un avantage sur un critère crucial, sa cote dans *M.P* augmente.

Chapitre 3. Analyse comparative des classes de modèles

3.1 Introduction

L'objet de ce chapitre est double : (i) décrire les différentes approches de modélisation utilisées pour l'appui à la prise de décision et (ii) analyser leur capacité à appréhender les caractéristiques inhérentes au développement durable. Pour cela, les cinq critères retenus dans notre approche méthodologique sont exploités et confrontés aux différentes approches de modélisation.

Cette phase du projet de recherche est organisée autour de l'analyse de la littérature et des outils disponibles à travers la rédaction de fiches-types par classe de modèles. On définit ici la *classe* comme un ensemble des modèles relevant du même paradigme scientifique. Cette analyse est à la fois descriptive et analytique, mais elle s'intéresse aux différentes classes de modèles de manière isolée. Une analyse complémentaire nécessaire devra s'attacher à l'analyse des *paradigmes* sous-jacents, mais quelques éléments préliminaires sont d'ores et déjà fournis dans cette note (voir la section 4).

Ce chapitre est organisé de la manière suivante. La section 2 présente le contenu des fiches élaborées pour chaque classe de modèle. La section 3 expose les différentes classes de modèles analysées. La section 4 s'intéresse à une série d'oppositions rencontrées couramment dans la littérature : ces oppositions ont le mérite de constituer une première porte d'entrée sur l'analyse des paradigmes sous-jacents en ce sens qu'elle se situe au-delà des modèles individuels et soulèvent des questions d'ordre davantage épistémologique que simplement méthodologique. Après ces quatre courtes sections liminaires, les sections 5 à 11 offrent une description des classes de modèles considérées et de leur capacité à rendre compte des cinq critères retenus dans notre méthodologie. Enfin, la section 6 propose une synthèse.

3.2 Organisation des « fiches-types »

Chaque classe de modèle est présentée à l'aide d'une fiche contenant les rubriques suivantes :

1. Dénomination (FR et EN)
2. Description générale
3. Domaines privilégiés d'application (exemples et références)
4. Atouts et faiblesses
5. Matrice et commentaires

La taille de chaque fiche est volontairement limitée, l'objectif étant d'être synthétique et orienté vers l'évaluation de l'applicabilité de l'outil pour le développement durable.

La matrice se présente sous la forme suivante :

Caractéristiques de durabilité	Respect du critère
1. Interdisciplinarité	
2. Intergénérationnalité	
3. Incertitude	
4. Participation	
5. Local / global	

Pour chaque critère, on essaie d'indiquer le degré d'adéquation de l'outil à l'aide d'une « cote » :

- « +1,5 » : adéquation forte
Exprime le fait que le modèle intègre le critère correspondant de manière satisfaisante, non-seulement pour lui-même mais également en intégration avec les autres dimensions prises en compte dans le modèle ;
- « +0,5 » : adéquation faible ou absente
Indique que le critère est absent du modèle ou non relevant ; elle ne préjuge cependant pas du fait que ce critère pourrait éventuellement être incorporé ;
- « -0,5 » : adéquation faible
Indique que le critère est présent dans le modèle ou qu'il pourrait l'être, mais néanmoins de manière imparfaite.

Cette codification est volontairement restreinte : des commentaires doivent donc accompagner cette matrice pour en justifier la cotation. Inévitablement, cette matrice prêterait à discussion, ce qui est presque son objectif : ces discussions permettront d'améliorer la connaissance et la perception que se font les différents acteurs de ses propriétés et de ses usages potentiels.

3.3 Aperçu des classes de modèles analysés

L'analyse du processus de décision (voir Boulanger et Bréchet (2001) et le chapitre 2) a révélé que les outils, les méthodes et les modèles jouent chacun un rôle spécifique. Nous nous concentrons, dans ce projet, sur l'analyse des modèles, mais il est évident que l'analyse peut d'être étendue à l'ensemble des outils et méthodes exploités pour l'aide à la prise de décision ; voir également Boulanger et Bréchet (2001) pour cette extension. Les différentes classes de modèles analysées sont les suivants : Modèles macro-économétriques, Modèles multi-agents, Modèles d'équilibre général calculable, Réseaux bayésiens, Modèles d'optimisation, Dynamique des systèmes.

3.4 Les modèles macro-économétriques

3.4.1 Dénomination

Modèles macro-économétriques (*macro-econometric models*).

3.4.2 Description générale

L'origine des modèles macro-économétriques est attribuée à Tinbergen en 1936 : celui-ci présente alors le premier exemple de modèle macro-économique complet, spécifié et chiffré. « Complet » signifie qu'il couvre l'ensemble de l'économie nationale, l'ensemble des agents économiques et des marchés. « Spécifié » signifie que les équations de comportement sont écrites sous forme mathématique. « Chiffré » signifie que le modèle est appliqué aux données issues de la comptabilité nationale (alors embryonnaire) et que des valeurs sont attribuées aux coefficients et paramètres des fonctions de comportement et relations structurelles.

Artus, Deleau et Malgrange (1986) mettent en exergue deux points méthodologiques généraux présents dans les travaux de Tinbergen. D'une part, l'objet du modèle est de *répondre à une question très concrète* : est-il possible, dans le contexte d'une économie internationale déprimée de relancer l'activité interne des Pays Bas sans détériorer la balance commerciale ? D'autre part, Tinbergen fait ressortir la spécificité fondamentale de l'approche modélisatrice : ramener un ensemble de phénomènes complexes à une formalisation simple. « Le processus de représentation (*stylization*) appelle un jugement du modélisateur sur les traits importants qu'il importe de traduire au mieux et ceux qui semblent plus secondaires. Pour répondre à la question soulevée, la représentation visée ne saurait rester elle-même purement qualitative mais doit atteindre le stade du quantitatif » (Artus *et al.*, 1986, p. 11).

Depuis lors, les modèles macro-économétriques ont connu un essor important comme outil d'aide à la décision. Ils ont été largement utilisés pour guider les politiques économiques des pays développés, surtout aux Pays Bas, bien sûr, mais aussi aux États-Unis, au Royaume Uni, en France, pour ne citer que les pays les plus expérimentés en la matière. Les modèles ont connu des améliorations sensibles tout en restant fidèles à la tradition ouverte par Tinbergen.

À la base du bouclage des modèles macro-économétriques, on trouvera le modèle keynésien de base renforcé et élargi dans plusieurs directions, notamment avec l'introduction des prix flexibles et de l'environnement international. Le modèle fonctionne comme un modèle keynésien de base de court terme (ce qui signifie que la composition du stock de capital reste inchangée) augmenté, justement, de l'accumulation du capital et de prix flexibles. La causalité-type est la suivante : la demande exogène détermine le produit, puis les variables de tension (taux d'utilisation), les salaires et les prix. Dès que les prix rétroagissent sur les grandeurs réelles (exportation, consommation privée...), le modèle n'est plus dichotomique, sphère nominale (déterminant les prix) et réelle (déterminant les quantités) sont alors fortement intégrées.

Le recours à l'économétrie confère à ces modèles une assise empirique importante : toutes les fonctions de comportement sont validées par l'économétrie. Celle-ci confère cependant au modèle un côté conservateur puisque l'économétrie suppose la rémanence des structures sous-jacentes. *Grosso modo*, l'horizon d'un tel modèle est donc limité à une dizaine d'années ; au-delà, on considère que les structures économiques se modifient trop pour que les estimations économétriques gardent encore leur validité.

3.4.3 Domaines privilégiés d'application

Les modèles macro-économétriques sont conçus pour évaluer les impacts macro-sectoriels et budgétaires de politiques de stabilisation (politiques contra-cycliques) ou de stratégies de développement sectorielles. Ils permettent deux types d'applications :

- projections (sur un horizon maximal d'une dizaine d'années) : la nature économétrique assure une validité empirique à ces projections, mais uniquement à court/moyen terme, grâce à la propriété de « reproduction des comportements passés ».
- évaluation de politique économique : les réactions des agents à un choc externe (modification du prix des énergies, par exemple) ou à une mesure de politique économique sont appréhendées par les fonctions de comportements estimées par l'économétrie et mises en relations à travers la structure néo-keynésienne et sectorielle du modèle ; les implications sur les finances publiques sont en général finement évaluées.

Dans le dernier cas, une comparaison est effectuée entre une projection de référence (à politique inchangée) et un scénario alternatif dans lequel une ou plusieurs mesures sont adoptées. Le modèle est donc souvent exploité pour réaliser le cadrage budgétaire de politiques envisagées, c'est-à-dire pour identifier les marges budgétaires existantes et les coûts des mesures *ex post*, c'est-à-dire compte tenu de tous les ajustements économiques qu'elles entraînent.

Les domaines d'application sont donc typiquement les politiques de relance par les dépenses publiques, l'investissement, les dévaluations, les politiques d'infrastructure, les politiques de l'emploi, toutes les mesures modifiant le système fiscal et para-fiscal (comme une taxe sur l'énergie), les effets d'une modification de l'environnement international (choc pétrolier, mouvements de changes, ralentissements conjoncturels...). Ces modèles ont été largement développés, dans les années '80, pour l'intégration des questions énergétiques, mais surtout en ce qui concerne les questions liées à la demande.

Les années '90 ont, dans la même veine, vu des développements sur les questions de CO₂, ces émissions étant directement rattachées, par un simple coefficient, aux consommations énergétiques par produits. Les modèles sont interdisciplinaires dans la mesure où les consommations d'énergie sont souvent modélisées en unités physiques et où certains processus de production énergétiques sont décrits de manière technologique.

3.4.4 Atouts et faiblesses

Les atouts sont la grande intégration entre dimensions sectorielles, macro-économiques et comptes d'agents (contraintes budgétaires, notamment pour l'Etat), le tout validé par les techniques économétriques. Le domaine de l'exogène est ainsi très faible (l'environnement international et les variables de politiques économiques) et le modèle se prête bien à la réalisation de projections à court et moyen terme. Les ordres de grandeurs fournis sont « réalistes » et non pas seulement « indicatifs ».

Les limites proviennent à la fois du plan théorique et économétrique (Assouline *et al.*, 1998). Les modèles se caractérisent, par leur nature néo-keynésienne, par une incapacité à reproduire certains mécanismes économiques, notamment ceux basés sur les effets d'offre (impact de la profitabilité ou de la R&D sur le volume de production...), bien que les modèles les plus récents aient fait des progrès sur ce point. Par ailleurs, la critique de Lucas (1976) et des théoriciens des anticipations rationnelles n'a jamais trouvé de parade convaincante : cette

critique argue que les estimations économétriques ne sont pas stables car elles sont influencées par la politique économique qui est menée. Il en va de même pour la critique de Sims (1980) sur l'insuffisance d'identification des modèles structurels.

Du point de vue du développement durable, ces modèles se sont cantonnés aux développements E3 (économie – énergie – environnement) sans que d'autres dimensions de la problématique ne soit réellement introduite (voir la matrice ci-dessous). Le contexte d'exploitation de ces modèles (l'évaluation quantitative des politiques macro-économiques) explique cela.

3.4.5 Matrice et commentaires

Tableau 4. Matrice M.C pour les modèles macroéconométriques

Caractéristiques de durabilité	Respect du critère	Commentaires
1. Interdisciplinarité	0,5	Les développements E3 (économie, énergie, environnement) sont très fréquents ; les aspects socioéconomiques sont présents grâce au marché du travail et à la formation des revenus ; les contraintes budgétaires des différents agents sont explicitées. Rares sont les disciplines non-économiques présentes.
2. Intergénérationnalité	-0,5	Aucun modèle ne distingue de générations d'agents, sauf parfois du point de vue patrimonial (endettement), mais sans considération d'équité intergénérationnelle. L'horizon du modèle reste le court/moyen terme économique (8 à 15 ans).
3. Incertitude	0,5	L'incertitude est évaluée à l'aide de tests de sensibilité, mais pas de manière systématique et uniquement sur les hypothèses, rarement sur les paramètres, ceux-ci étant estimés par l'économétrie et donc empiriquement validés. Très rares sont les projections mettant en évidence les marges d'incertitude.
4. Participation	-0,5	Les modèles sont orientés pour la prise de décision publique : chaque acteurs a une fonction de comportement individuelle, l'échange d'information s'effectue par les prix. Les différents niveaux décisionnels ne sont pas distingués.
5. Local / global	0,5	Il existe des modèles mondiaux ou couvrant de grandes zones géographiques, bien que peu de modèles soient appliqués aux pays en développement (préoccupations inadéquates, manques de données...).

3.5 Les modèles multi-agents

3.5.1 Dénomination

Modèles multi-agents (*multi-agent models*)

3.5.2 Description Générale

La modélisation multi-agents appartient à une nouvelle génération de modèles systémiques. Il s'agit d'une technique de modélisation stochastique qui repose sur la représentation informatique de populations d'agents interagissant les uns avec les autres et avec leur environnement au sein d'un univers artificiel. Celui-ci est généralement réduit à une figure géométrique (treillis, tore, etc) constituée de cellules élémentaires possédant chacune un nombre restreint de propriétés (quantité d'une ou plusieurs ressources, capacité d'absorption d'un polluant...). A cet égard, on peut noter que la représentation de l'environnement répond lui-même le plus souvent à un type de modèle utilisé en mathématiques et en physique pour étudier les dynamiques non-linéaires de phénomènes discrets et dénommé « automate cellulaire » (*Cellular Automata*). Rien n'empêche cependant de représenter de façon beaucoup plus réaliste un environnement réel, chaque cellule désignant alors une portion délimitée d'un territoire (ville, région...) avec ses caractéristiques réelles (usage du sol, pente, densité de peuplement, etc.). Rien ne s'oppose non plus, en théorie, à utiliser une représentation du territoire fournie par un système d'information géographique¹⁴ comme cadre des interactions entre agents et de leur relation aux ressources spatiales.

Les agents sont des entités autonomes capables de percevoir (plus ou moins bien) l'état de leur environnement (en l'occurrence les propriétés des cellules sur lesquelles ils se situent ainsi qu'un certain nombre de celles qui les entourent), de se déplacer, d'interagir avec d'autres agents (coopérer, procréer, entrer en compétition...), et de modifier leur environnement (prélever des ressources, cultiver, irriguer, bâtir, etc.). Chaque agent est généralement pourvu d'un programme comportant des buts à atteindre (survivre, se reproduire, accumuler...), et est caractérisé à tout moment par sa situation dans le monde artificiel (localisation dans l'espace) et son état interne (i.e. les valeurs de ses variables internes). Il est important de préciser que la notion d'agent peut évidemment s'appliquer à n'importe quel type d'individu et désigner aussi bien tour à tour une personne humaine, un groupe social, une entreprise, une institution, un Etat-nation, etc.

La modélisation consiste, par exemple, à étudier par simulation les chances de succès (c'est-à-dire de survie et de reproduction) de différentes populations d'agents dans cet environnement. Le modèle théorique sous-jacent est alors celui de la théorie darwinienne de l'évolution : les agents qui possèdent les capacités de perception et de comportement les plus adaptées à leur environnement sont les plus susceptibles d'y survivre et de se reproduire, transmettant ainsi leur « patrimoine » comportemental à de nombreux descendants et chassant de l'environnement les agents moins bien adaptés. On peut donc tester ainsi les chances de survie de modèles

¹⁴ C'est d'ailleurs le cas pour certains modèles développés avec le logiciel Cormas par l'équipe de Bousquet au CIRAD.

comportementaux distincts dans de nombreux environnements possibles ¹⁵. Les modèles multi-agents sont donc fondamentalement stochastiques. La méthode ne consiste pas à étudier quelques simulations ou quelques scénarios mais à analyser plusieurs dizaines de simulations successives, chacune correspondant à un tirage aléatoire des populations de départ (nombre et caractéristiques des agents) et de l'état initial de l'environnement.

Elle peut également avoir pour objet l'étude des conditions de possibilité d'émergence de structures collectives, supra-individuelles comme des entités politiques, des classes sociales, des institutions (marché) à partir des interactions d'unités élémentaires.

La notion de développement durable peut prendre une signification spécifique dans un tel contexte. C'est ainsi que Epstein et Axtell (1996), dans leur ouvrage déjà classique sur les sociétés artificielles, définissent le caractère non-durable d'un modèle de comportement dans les termes suivants :

« In this context, when people are saying that some behaviour – a rule – is 'unsustainable', they mean that continued operation under the relevant behavioural rule will transform the environment – perhaps quite suddenly and irreversibly – into one that is highly inhospitable to agents obeying that rule » (163).

3.5.3 Domaines d'application

La modélisation multi-agents se prête à de nombreuses applications. Partout où il est utile de prendre en compte une pluralité d'individus ayant des caractéristiques différentes et de représenter finement leurs interactions (entre eux et avec leur environnement), la modélisation multi-agents s'impose comme la seule alternative.

En fait, la modélisation multi-agents constitue probablement le seul moyen de rendre compte effectivement de la complexité.

Jusqu'ici, il faut bien constater que les modèles de ce type ont surtout été utilisés à des fins purement scientifiques. Cependant, les applications pratiques deviennent de moins en moins rares, qu'il s'agisse par exemple de représenter les comportements des ménages en matière de consommation (De Vries), ou ceux d'agriculteurs et de pêcheurs dans leur utilisation de ressources collectives (Bousquet), etc.

3.5.4 Atouts et faiblesses

Les atouts de cette approche sont essentiellement :

- La prise en compte de la diversité. Les modèles multi-agents permettent une représentation adéquate de la diversité des agents, et donc, lorsqu'il s'agit de modèles d'individus humains, de prendre en compte la diversité de talents, de compétences, de goûts, d'aspirations, etc. Ceci rend possible une représentation plus réaliste des comportements individuels et collectifs qu'en se limitant à la représentation d'un seul acteur-type (agent représentatif).

¹⁵ La transmission de modèles comportementaux acquis tient davantage de la transmission culturelle que de l'héritage biologique, à moins de revenir à une version lamarckienne de celui-ci.

-
- La représentation de l'interaction entre agents et entre ceux-ci et la « nature ». Certes, les modèles de théorie des jeux constituent déjà des représentations axiomatiquement bien structurées des phénomènes d'interaction et des stratégies. Cependant, le caractère analytique de l'approche mathématique restreint son champ d'application aux formes les plus simples et les plus abstraites d'interaction. Les modèles multi-agents, dont beaucoup d'applications s'inscrivent d'ailleurs dans l'axiomatique de base de la théorie des jeux, permettent de dépasser les limites d'une approche formelle des jeux et d'analyser des situations beaucoup plus complexes et réalistes.
 - La possibilité de modéliser l'espace d'abord comme *territoire*, c'est-à-dire comme support de ressources naturelles et d'activités humaines diversement réparties mais aussi comme *topologie*, c'est-à-dire en termes de proximité et d'éloignement, d'accessibilité et d'inaccessibilité, de centre et de périphérie, etc. De ce fait, les phénomènes d'imitation, de contagion, de diffusion, de compétition, etc., peuvent recevoir une représentation adéquate.

La modélisation multi-agents est clairement *bottom up* au sens le plus fort. Elle rend précisément compte des structures et des systèmes comme l'émergence de macro-structures stables à partir de micro-comportements locaux parfois extrêmement simples comme dans le célèbre modèle de ségrégation spatiale de Schelling où l'on explique la formation et la stabilisation de quartiers urbains homogènes par la recherche par chaque agent d'un voisinage comportant un minimum de 30% d'individus du même groupe que lui. Elle représente donc une avancée importante dans la réalisation d'un programme authentiquement réductionniste en science sociale qui vise à expliquer les systèmes culturels, les institutions et même les entités politiques (on parle souvent de self-organisation) en termes de comportements individuels élémentaires, sans pour autant devoir adopter des hypothèses fortes en matière de rationalité et de capacité de calcul de ces entités élémentaires. C'est pourquoi de tels modèles sont construits pour analyser la formation de marchés et de prix d'équilibre, de nations, de groupes linguistiques, etc.

Les faiblesses sont :

- L'absence de modèles théoriques suffisamment puissants et validés pour fonder une représentation satisfaisante des comportements d'individus complexes et hétérogènes. Il est, en effet, peu utile de permettre la modélisation de l'hétérogénéité des déterminants du comportement si l'on ignore comment cette hétérogénéité se traduit dans des comportements différents. Les modèles psychologiques des agents sur base desquelles sont construits les programmes d'action des agents sont encore trop rudimentaires et comportent une part non négligeable d'arbitraire.
- La validation de tels modèles est évidemment encore plus exigeante que celle des modèles agrégés. On peut, certes, considérer le modèle comme valide s'il reproduit de façon satisfaisante le comportement du système représenté dans ses caractéristiques agrégatives mais ce serait faire fi de ce qu'un état du macro-modèle peut être compatible avec une multiplicité d'états différents de ses composantes individuelles.

3.5.5 Matrice et commentaires

Tableau 5. La matrice M.C pour les modèles multi-agents

Caractéristiques de durabilité	Respect du critère	Commentaires
1. Interdisciplinarité	1,5	Ce genre d'approche se prête aisément à la collaboration entre disciplines différentes : les écologistes et les biologistes pouvant représenter les variables qui les intéressent soit par les propriétés des cellules de l'espace environnemental soit par des agents particuliers (végétaux, animaux) ; les économistes, les sociologues, les anthropologues et les politologues, quant à eux, peuvent représenter des comportements, des institutions et même des cultures entières sous forme de règles de perception, d'évaluation, de communication, d'interaction et de décision.
2. Intergénérationnalité	1,5	Dès lors que les agents peuvent être représentés entre autres selon des attributs tels que l'âge et la génération et que le déroulement même de la simulation s'accompagne du vieillissement naturel des individus et de la succession des générations, cette approche est parfaitement adaptée à la représentation des problèmes de justice intergénérationnelle. Les exemples d'application de l'approche multi-agents à la modélisation de l'apparition, du développement et de la disparition de civilisation entières comme les Anasazi dans le projet « Artificial Anasazi » ou les populations du paléolithique supérieur (entre - 30000 et -15000) en France dans le modèle EOS (Evolution Of Organized Societies) témoigne à l'évidence qu'elle se prête particulièrement bien également à la prise en compte du long terme, et même du très long terme.
3. Incertitude	1,5	D'une part, les modèles multi-agents sont, comme on l'a précisé, fondamentalement stochastiques. D'autre part, il est aisé d'introduire l'aléatoire à tous les niveaux de définition du modèle, que ce soit dans le comportement des agents ou dans les événements situés dans leur environnement.
4. Participation	1,5	La modélisation multi-agents effectuée dans un contexte d'aide à la décision semble se prêter particulièrement bien à l'intégration des parties-prenantes si l'on en juge par les expériences de gestion participative des ressources naturelles menées par le CIRAD. En effet, celles-ci peuvent plus aisément se reconnaître dans des agents autonomes évoluant au sein d'un environnement calqué que dans les équations d'un modèle structurel agrégé. Cet usage des MAS (<i>multi-agent simulations</i>) dans un contexte participatif est appelé par les chercheurs du CIRAD <i>modélisation d'accompagnement</i> .

5. Local / global	1,5	Les interactions entre niveaux trouvent au sein des MAS le traitement le plus satisfaisant. Les macro-structures (le global) émergent des comportements aux niveaux inférieurs (local) mais en retour constituent un ensemble de contraintes pour les niveaux qu'elles contrôlent. Les interactions prises en compte sont donc non seulement horizontales mais également verticales.
-------------------	-----	--

3.6 Les modèles d'équilibre général calculables

3.6.1 Dénomination

Modèles d'équilibre général calculable (*computable general equilibrium models*).

3.6.2 Description générale

Les modèles d'équilibre général calculables (MEGC) s'appuient sur une représentation walrasienne de l'économie : la dynamique économique résulte de la confrontation, *via* les mécanismes de marché, des comportements optimisateurs d'agents micro-économiques (consommateurs, producteurs, Etat, reste du monde). L'ajustement entre l'offre et la demande sur l'ensemble des marchés détermine un vecteur de prix d'équilibre ainsi que l'allocation des ressources et la répartition des revenus. L'algorithme de Scarf (1973) a permis la résolution d'une procédure de tâtonnement walrasien et a du même coup ouvert le champ à la construction de modèles empiriques entièrement fondés sur la théorie de l'équilibre général (Shoven et Whalley, 1992). Voir le *survey* de Borgès (1986).

Intrinsèquement, ces modèles exploitent un tableau entrées-sorties pour rendre compte des relations intersectorielles, mais le contexte d'équilibre général prix assure une intégration parfaite des sphères nominales et réelles et des effets de demande et d'offre. En outre, ces modèles définissent les fondements micro-économiques des évolutions macro-économiques, éludant ainsi les critiques de Sims et de Lucas. Les paramètres et coefficients sont généralement déterminés par calibrage, qui est une procédure mathématique d'identification des paramètres structurels. En fait, ces modèles s'appuient sur des spécifications de demandes de facteurs, d'offre de travail, de demande de biens et services qui ont déjà fait l'objet de nombreuses estimations économétriques sur séries chronologiques ou en coupe. Les choix de coefficients ne sont donc pas nécessairement arbitraires, mais ils ne sont pas validés de manière intégrée par l'économétrie. Ceci ouvre la voie à une approche plus prospective de la modélisation, mais nécessite également un recours plus systématique aux tests de sensibilité. Le nombre de variables explicatives retenues dans ces modèles et les niveaux de désagréments sont parfois très élevés, ce qui est rendu possible par le calibrage (plusieurs centaines de ménages ou de secteurs productifs sont fréquents).

Là où les modèles macro-économétriques offrent une capacité à reproduire le passé (validation *ex post*) comme preuve de réalisme, les MEGC suggèrent plutôt de s'exonérer du passé et d'explorer les futurs de manière théoriquement rigoureuse. Certains modèles font toutefois usage de l'économétrie pour asseoir les fondements empiriques de certaines relations de comportement, notamment dans les systèmes d'allocation les plus complexes ; voir par exemple Jorgenson et Wilcoxon (1993) ou Bréchet (1998).

Les modèles peuvent être statiques ou dynamiques. On admet le plus souvent que l'hypothèse de flexibilité des prix et la capacité à rendre compte d'ajustements structurels sont synonymes de long terme. Certains modèles intègrent néanmoins des mécanismes d'inertie ou de coûts d'ajustement, d'autres introduisent des imperfections dans le fonctionnement des marchés (concurrence imparfaite, rigidités...). Certains modèles distinguent les agents par génération et explorent alors le long terme (dynamique intergénérationnelle).

Les résultats fournis par ces modèles sont essentiellement « indicatifs ». Les résultats des politiques sont évalués par rapport au bien-être, soit par rapport à un optimum de Pareto, soit en optimum de second rang. Dans ce dernier cas, le plus fréquent aujourd'hui, l'objectif est de réduire les distorsions fiscales inhérentes au système en vigueur par rapport à un objectif donné, sous respect des contraintes budgétaires.

3.6.3 Domaines privilégiés d'application

Ces modèles sont incapables de réaliser des projections et sont destinés à évaluer les impacts en terme de bien-être de politiques jouant sur les prix, la fiscalité ou les échanges, par exemple. Le niveau parfois très élevé de désagrégation, notamment pour le système fiscal, permet d'analyser les questions d'imposition directe et de répartition. De nombreux modèles ont été développés sur les questions énergétiques (GEM-E3, par exemple), avec une forte intégration dans la sphère économique, à l'instar des modèles macro-économétriques. Le cadre théorique permet toutefois d'évaluer certains instruments spécifiques, tels que les permis d'émission négociables. Ils sont également souvent très développés du point de vue géographique, permettant d'évaluer les questions du commerce international.

3.6.4 Atouts et faiblesses

Leur atout principal réside dans la solidité des fondements théoriques basés sur la théorie micro-économique. Les comportements macro-économiques agrégés sont ainsi entièrement explicités par des mécanismes micro-économiques, ce qui n'est pas le cas dans les modèles macro-économétriques (courbes de Phillips, par exemple). Cette assise théorique permet d'utiliser le modèle comme explicatif des mécanismes en vigueur : le cadre macro-économique permet ensuite de tester la validité d'une spécification théorique en analysant les résultats de simulation. Le calibrage permet ensuite une désagrégation très importante du modèle, bien que cette qualité soit de moins en moins exploitée aujourd'hui.

La faiblesse principale concerne le cadre d'équilibre et son opérationnalité empirique. Les mécanismes sur lesquels repose le modèle sont très abstraits et éloignés de la perception que l'on se fait des mécanismes économiques courants. Cette dimension abstraite rend les enseignements du modèle parfois difficiles à interpréter et à resituer dans leur contexte théorique. Le calibrage, enfin, est source d'arbitraire et le nombre élevé de paramètres empêche de réaliser des tests de sensibilité systématiques.

3.6.5 Matrice et commentaires

Tableau 6. La matrice M.C pour les modèles d'équilibre général calculables

Caractéristiques de durabilité	Respect du critère	Commentaires
1. Interdisciplinarité	0,5	Les développements E3 (économie, énergie, environnement) sont très fréquents, ainsi que les aspects socioéconomiques (répartition des revenus); les contraintes budgétaires des différents agents sont explicitées. Peu de disciplines non-économiques sont néanmoins incorporées, si ce n'est avec certains travaux les plus récents une meilleure prise en considération des aspects technologiques (dans les fonctions de production).
2. Intergénérationnalité	1,5	Certains modèles distinguent des générations d'agents et procèdent à une véritable optimisation inter-temporelle. Les arguments des fonctions d'utilité restent néanmoins souvent basiques (ils n'intègrent pas de préférence pour l'environnement) et le temps long n'est pas intégré en tant que tel, ni les disynchronies entre les systèmes humains, économiques et naturels.
3. Incertitude	0,5	L'incertitude peut être évaluée à l'aide de tests de sensibilité, mais ce n'est pas systématique et cela ne porte en tous cas jamais sur l'ensemble des paramètres, en raison de leur grand nombre. L'intégration de la notion de risque est inexistante, mais elle pourrait techniquement se faire (par la théorie des options réelles).
4. Participation	0,5	Les modèles sont orientés vers l'analyse des interactions entre des agents individuels : chaque acteur a une fonction de comportement et l'échange d'information s'effectue par les prix. La théorie des jeux est parfois exploitée pour enrichir les propriétés. Néanmoins, ces modèles ne sont pas utilisés (à part quelques exceptions limitées) pour dialoguer avec les parties prenantes.
5. Local / global	0,5	Les techniques de construction (calibrage) permettent d'élaborer des modèles de très grande taille, et donc mondiaux. Néanmoins, les interactions multi-level sont inexistantes.

3.7 Les réseaux bayésiens

3.7.1 Dénomination

Réseaux bayésiens (*Bayesian network*), réseaux probabilistes (*probabilistic network*), *belief network*

3.7.2 Description Générale

Un réseau bayésien est un graphe acyclique orienté (en anglais *DAG* : *directed acyclic graph*) dont les sommets (nœuds) représentent des variables (états, événements...) reliées entre elles par des relations de causalité représentées par des arcs. Un arc relie une et une seule variable à une et une seule autre. Un arc reliant une variable A à une variable B signifie que A constitue une cause de B (ou que A influence B). Elle est dite alors un « parent » de B. Une même variable B peut avoir plusieurs parents A_1, A_2, \dots, A_n . Par ailleurs, une variable A peut être parent de plusieurs autres variables, B_1, B_2, \dots, B_n . La relation de parenté est transitive : les parents de mes parents sont mes parents. L'ensemble des parents directs et indirects d'une variable est appelé ses « ancêtres ». Comme l'indique le qualificatif « acyclique », aucun arc ou aucune séquence d'arcs ne peut « remonter » d'une variable vers l'une quelconque des ses ancêtres. Par ailleurs, toute variable doit avoir au moins soit un parent soit un enfant.

Les variables peuvent être discrètes (ce qui est le cas le plus fréquent) ou continues. A chaque variable discrète est associée une distribution de probabilité complète. Les variables continues obéissent à une distribution théorique dont les paramètres (moyenne, variance) sont donnés. Les distributions de probabilités nécessaires pour initialiser les modèles sont de deux types : marginales pour les variables qui n'ont pas de parent, conditionnelles aux valeurs de leurs parents pour les autres.

Le modèle a pour fonction d'une part, de représenter les liens de causalité qui lient des phénomènes les uns aux autres et, d'autre part, d'utiliser l'information relative à l'état d'une variable quelconque A pour connaître celui d'une autre variable B du modèle, quel que soit par ailleurs le lien entre A et B, et cela en utilisant exclusivement les axiomes et théorèmes de la théorie des probabilités. Le qualificatif de « bayésien » qui leur est attribué témoigne de l'importance du théorème de Bayes pour le calcul des probabilités *a posteriori* d'une variable connaissant l'état d'une ou plusieurs autres. Rappelons en effet que ce théorème permet de faire circuler l'information dans les deux sens au sein du modèle, des causes vers les effets et, également, des effets vers les causes.

Pratiquement, un réseau bayésien est d'abord initialisé avec les valeurs *a priori* des différentes variables qui le composent. Ces valeurs proviennent soit d'observations historiques, soit d'une quelconque autre connaissance *a priori*. Celles-ci sont de nature probabilistes, c'est-à-dire que chaque état possible de la variable reçoit une valeur comprise entre 0 et 1 et telle que leur somme = 1.

Une variable peut être dans l'un des trois états suivants :

- une distribution *a priori* provenant d'observations antérieures ou d'informations *a priori*
- une distribution *a posteriori* suite à l'introduction d'informations concernant les autres variables du modèle ;

-
- une certitude lorsque de nouvelles observations portant directement sur une variable permettent de connaître son état avec certitude. Celle-ci est introduite dans le modèle en remplaçant la distribution de probabilité *a priori* par la valeur 1 pour l'état observé et 0 pour les autres états. L'algorithme utilisé (il en existe plusieurs) répercute ensuite cette information dans l'ensemble du graphe en transformant de proche en proche les distributions *a priori* en distributions *a posteriori* (sauf pour les variables pour lesquelles on dispose déjà d'une certitude). Le processus continue tant qu'il reste des observations en cours ou tant que l'on estime ne pas avoir suffisamment d'information compte tenu du but poursuivi : estimer le risque de voir se produire tel événement, prendre une décision, etc. En règle générale, les variables dont on cherche à connaître la distribution *a posteriori* sont des variables inobservables pour lesquelles il n'est jamais possible d'obtenir de certitude basée sur l'observation. Mais ces variables inobservables (dites latentes) sont reliées à d'autres pour lesquelles, en revanche, des observations sont possibles. Lorsqu'une variable inobservable est parente de l'une ou l'autre variable observable, celle-ci constitue un indicateur de celle-là. Connaissant la distribution de probabilité *a priori* de l'indicateur conditionnellement à la variable latente, toute observation sur l'indicateur peut être utilisée pour réviser les croyances relativement à la variable latente. On constate donc que le modèle du réseau bayésien offre une définition rigoureuse de la notion d'indicateur et une axiomatique qui permet de conceptualiser la relation entre la variable latente et ses indicateurs.

La contribution propre de la représentation sous forme de graphe au modèle par rapport à la théorie des probabilités est de fournir une représentation des relations d'indépendance conditionnelle entre les différentes variables (exprimée par la propriété dite de « D-Séparation ») sans lesquelles la propagation de l'information devrait à chaque observation passer par le calcul de la distribution de probabilité conjointe de toutes les variables du modèle, ce qui est pratiquement irréalisable dès que le nombre de variables et/ou d'états possibles pour celles-ci dépasse un seuil, par ailleurs très rapidement atteint par n'importe quel problème réel intéressant.

3.7.3 Domaines d'application

Le nombre et les domaines d'applications des réseaux bayésiens sont encore limités du fait de l'extrême jeunesse de la méthode. Les algorithmes permettant de tirer profit des conditions d'indépendance conditionnelle telles que liées au graphe des variables datent seulement de la fin des années 80 (Lauritzen, 1988).

Le modélisation par réseau bayésien est particulièrement utile pour la production d'un diagnostic ou d'un pronostic où il s'agit de trouver la cause la plus probable (par exemple une maladie) d'un certain nombre de phénomènes observables avec plus ou moins de précision et d'exactitude (les symptômes, par exemple). C'est en effet dans le domaine médical que ce type de modèle est le plus répandu. Ainsi, le modèle Pathfinder intégré au produit Intellipath, commercialisé par Chapman & Hill est une application de la méthode du réseau bayésien à l'interprétation de données histologiques provenant de biopsies en vue de détecter une pathologie parmi trente possibles. Les réseaux bayésiens ont également permis d'améliorer la recherche de localisation de certains gènes dans le cadre du projet « génome humain ».

Une des applications les plus répandues – sans que la plupart des gens en aient conscience – est le moteur du système d'aide de Microsoft Office, symbolisé par le trombone victime de la danse de Saint Guy qui vient perturber le travail des utilisateurs de Word ou d'Excel. Microsoft a investi énormément dans cette technologie et a mis au point, dans ses centres de recherche, un logiciel de construction et de manipulation de réseaux bayésiens, (MSBNx).

Le logiciel Vista construit par la NASA pour analyser les données concernant les moteurs de positionnement orbital de la navette spatiale (25000 paramètres suivis en temps réels) repose sur un réseau bayésien. Dans ce cas, un modèle de prise de décision fondé sur un calcul de l'utilité est associé au modèle bayésien.

On a pu démontrer l'utilité des réseaux bayésiens dans la détection précoce du risque de crise alimentaire à partir d'indicateurs récoltés dans le Sud de Madagascar compte tenu de l'état de différents indicateurs relatifs aux conditions climatiques, aux prix, aux comportements observés, etc. (Boulanger, 2002).

3.7.4 Atouts et faiblesses

Les réseaux bayésiens sont essentiellement des modèles d'évaluation des risques.

Ce type de modélisation ne se prête pas naturellement à la représentation de systèmes dynamiques puisqu'elle ne permet aucun feedback (le graphe doit être acyclique) et ne traite que de probabilités et non de quantités physiques ou monétaires (stocks et flux). La dimension temporelle peut cependant n'être pas tout à fait absente si l'on considère comme variables différentes les états successifs d'une même variable.

Les atouts principaux de cette approche sont donc :

- Un traitement rigoureux de l'incertitude en termes probabilistes.
- La possibilité de combiner variables quantitatives et qualitatives, ou de développer une approche quantitative avec des variables exclusivement qualitatives (nominales) ou semi-quantitatives (à intervalles).
- Le caractère évolutif : les modèles de réseau bayésien sont capables d'apprentissage dans la mesure où toute nouvelle observation permet de réviser la distribution a priori de la variable concernée. De plus, il est toujours possible d'ajouter un parent ou un enfant à une variable quelconque sans devoir ré-initialiser l'ensemble du modèle. Seule la distribution de probabilité conditionnelle de la variable qui se voit attribuer une cause supplémentaire doit alors être ré-estimée, ce qui donne une grande flexibilité à l'approche.

Les faiblesses tiennent surtout au fait que le nombre de parents directs que peut recevoir une même variable, bien que théoriquement illimité, est pratiquement limité par le fait qu'il est nécessaire de disposer de la distribution conditionnelle conjointe de cette dernière par rapport à l'ensemble de ses parents. Soit pour une variable à trois états, dépendant de trois autres variables à trois états également, un tableau de probabilités de $3^4 = 81$ valeurs. Il existe cependant certaines techniques (Noisy-OR, Noisy-AND,...) qui permettent de réduire le nombre de données nécessaires mais elles ne sont pas applicables dans tous les cas.

3.7.5 Matrice et commentaires

Tableau 7. La matrice M.C pour les réseaux bayésiens

Caractéristiques de durabilité	Respect du critère	Commentaires
1. Interdisciplinarité	1,5	Les réseaux bayésiens peuvent combiner des variables provenant de domaines extrêmement diversifiés. La seule condition pour leur introduction dans un modèle est que l'on puisse obtenir les distributions de probabilité conditionnelle a priori nécessaire.
2. Intergénérationnalité	0,5	Ce type de modèle ne convient pas particulièrement à une problématique réellement intergénérationnelle. En effet, il est presque impossible de modéliser des effets d'accumulation ou de déplétion en termes de probabilités. En revanche, il est possible d'introduire dans un même modèle des variables situées à des moments différents du temps (probabilité de connaître une désertification dans 30 ans sachant les émissions de CO ₂ dans 10, etc.)
3. Incertitude	1,5	On est tenté de mettre 1,5 ici dans la mesure où l'approche en réseaux bayésiens est fondamentalement une évaluation des risques. Toutes les variables étant exprimées sous forme de probabilités, l'incertitude est constitutive de l'approche.
4. Participation	1,5	La participation des parties prenantes peut être organisée à deux niveaux. D'abord dans la construction du graphique exprimant les relations causales au sein du système. Les outils informatiques existants permettent en effet de créer le graphique des relations entre variables à l'ordinateur ce qui se prête à l'organisation de séances collectives de « brain-storming » sur la structure du système. Ensuite, les connaissances des parties prenantes sont parfois indispensables pour l'estimation de certaines probabilités <i>a priori</i> . Par ailleurs, même si les algorithmes utilisés sont parfois assez complexes, la logique générale de l'approche est relativement aisée à comprendre et à s'approprier.
5. Local / global	0,5	Le niveau auquel une variable se réfère n'a aucune incidence sur l'analyse en termes de réseau bayésien. Dès le moment où l'on est en mesure de construire une distribution de probabilité conditionnelle, le mélange de niveaux est parfaitement acceptable. Par exemple, on peut sans difficulté introduire la distribution de probabilité d'une variable locale compte tenu d'une variable globale (taux de chômage à Namur conditionnellement au PIB belge de l'année précédente, par exemple). Par ailleurs, la contribution d'une variable locale à une variable globale peut être représentée également en termes de distribution de probabilité de cette dernière conditionnellement à la première. En revanche,

		l'approche se prête mal à une endogénéisation de ces rapports. Elle ne permet pas de rendre compte de l'émergence de phénomènes de niveau supérieur à partir de processus à un niveau inférieur.
--	--	--

3.8 Les modèles d'optimisation centralisée

3.8.1 Dénomination

Modèles d'optimisation (*optimization models*).

3.8.2 Description générale

On appelle optimisation la représentation mathématique d'un problème d'optimisation d'une fonction objectif de plusieurs variables en présence de contraintes. Le programme est dit linéaire si la fonction et les contraintes sont toutes des combinaisons linéaires de variables. Il compte alors n variables non négatives, m contraintes d'égalité ou d'inégalité et une fonction objectif à optimiser et les variables de coût ou de profit associées à chaque variable présente dans la contrainte (Guéret *et al.*, 2000).

La notion de *centralisée* vient du fait qu'une fonction objectif unique est considérée, quelle que soit l'échelle spatiale ou organisationnelle du système modélisé (une unité de production ou un système énergétique à l'échelon d'une nation).

Un programme linéaire possède une interprétation économique très large. La programmation linéaire définit une classe vaste de modèles dans lesquels deux hypothèses sont formulées : la proportionnalité des coûts et des consommations de ressources aux intensités d'activité (soit : rendements d'échelle constants) et l'additivité des consommations de ressources (soit : pas d'interaction entre les activités).

3.8.3 Domaines privilégiés d'application

Les modèles d'optimisation trouvent des applications dans tous les domaines technologiques, qu'ils se situent à l'échelon d'une unité de production individuelle, d'une groupe ou d'une entité géographiquement plus étendue. Il est clair que plus le centre de décision est centralisé, plus ce type de modèle est intéressant ; au fur et à mesure que les centres de décisions se multiplient, l'approche devient moins opérante.

A l'extrême, un modèle d'optimisation n'est guère réaliste pour représenter un marché sur lequel une multitude d'agents rétroagissent, comme cherche à le faire la théorie économique. A cet égard, du point de vue de la représentation du fonctionnement des marchés et du comportement des individus, on peut dire que les modèles d'équilibre général calculable et les modèles d'optimisation s'opposent.

3.8.4 Atouts et faiblesses

Les atouts de ces modèles tiennent d'abord dans leur description explicite des choix technologiques possibles. Coûts d'investissement et d'exploitation sont explicitement pris en

considération dans le choix des mesures dans un cadre généralement cohérent avec une théorie de l'investissement (calcul d'une valeur actuelle nette, d'un temps de retour...).

Les limites proviennent de trois sources essentielles. D'une part, le choix des technologies candidates (c'est-à-dire susceptibles d'être adoptées) relève du jugement de l'expert, ce qui peut avoir un côté arbitraire ou partial. Si une option technologique n'est pas introduite dans le modèle, elle ne pourra évidemment jamais être sélectionnée par ce dernier, ce qui montre que ce premier élément est essentiel. Le jugement de l'expert qui sélectionne les technologies candidates peut être erroné soit sur les performances, soit sur les coûts. Pour toute technologie donnée dans le modèle, toute erreur sur ces caractéristiques va biaiser le résultat du modèle : le risque d'erreur est d'autant plus élevé que le nombre et la diversité des données à récolter sont importants. C'est l'un des désavantages des modèles très désagrégés, quelle que soit leur nature.

Enfin, un modèle d'optimisation centralisée suppose une information parfaite, à la fois sur les performances technologiques et sur les coûts, à travers l'ensemble du système. Cette hypothèse peut être réaliste lorsque l'on sait qu'un décideur unique centralisé détient effectivement toutes ces informations ; elle est plus discutable lorsque la taille du système modélisé dépasse cette échelle, ce qui est le cas pour des approches telles que Markal et, plus encore Markal-Matter. Lorsque le système modélisé incorpore les prises de décisions d'agents partiellement ou totalement indépendants les uns des autres (si ce n'est via le marché), alors l'hypothèse d'optimisation centralisée est irréaliste. Elle conserve sa nature normative mais elle perd totalement sa crédibilité du point de vue du fonctionnement réel du système (imperfections de marchés, information imparfaite...).

3.8.5 *Matrice et commentaires*

Tableau 8. La matrice M.C pour les modèles d'optimisation centralisée

Caractéristiques de durabilité	Respect du critère	Commentaires
1. Interdisciplinarité	0,5	Les modèles de recherche opérationnelle sont très orientés vers une analyse technico-économique des phénomènes technologiques et de procédés de production. Ils ne sont donc peu appropriés pour une approche inter-disciplinaire. Toutefois, l'approche optimisatrice peut s'appliquer à tout domaine, pourvu que l'on accepte de se plier aux contraintes formelles qui sont les siennes.
2. Intergénérationnalité	0,5	La dimension intergénérationnelle n'apparaît pas telle quelle dans ce type de modèles. La dimension long terme est présente à travers le concept d'optimisation qui rend les résultats pertinents seulement « à long terme », soit de manière atemporelle, un peu à l'instar des modèles d'équilibre général, soit par une véritable optimisation intertemporelle. Les générations ne sont pas distinguées en tant que telles, si ce n'est par le renouvellement des technologies éligibles, soit uniquement du point de vue technologique : aucune dimension sociale ou patrimoniale n'est intégrée.

3. Incertitude	0,5	L'incertitude peut être appréhendée par une modélisation stochastique (voir la version stochastique du modèle Markal). Néanmoins, ces approches sont limitées par la lourdeur des traitements numériques et la nécessité de connaître <i>a priori</i> les distributions de probabilité attachées aux (très nombreux) paramètres du modèle.
4. Participation	-0,5	Ce critère ne s'applique pas à cette classe de modèles.
5. Local / global	-0,5	A l'instar du critère précédent, ce critère ne s'applique pas aux modèles d'optimisation centralisée : l'approche se veut normative (fournir la solution permettant de remplir au mieux l'objectif fixé compte tenu des contraintes données).

3.9 Les modèles de dynamique des systèmes

3.9.1 Dénomination

Modèles de dynamique des systèmes (*system dynamics models*)

3.9.2 Description générale

On doit à J. Forrester l'invention de la dynamique des systèmes comme méthode de représentation graphique et de simulation numérique de systèmes dynamiques complexes mais aussi comme théorie transdisciplinaire des systèmes sociaux.

La « system dynamics » constitue en fait une interprétation particulière de la théorie des servomécanismes (ou cybernétique) aux phénomènes humains et sociaux. Les caractéristiques principales de la méthode sont les suivantes :

- Les systèmes dynamiques sont représentés en termes de stocks et de flux. Forrester insiste beaucoup sur l'importance de cette représentation pour obtenir une image adéquate du comportement dynamique du système. Les variables de stock sont appelées « niveaux » (*levels*) et les variables de flux sont appelés « taux » (*rates*). Les variables de niveaux correspondent à des intégrales, c'est-à-dire à des valeurs instantanées, qui s'accroissent ou diminuent entre deux instants données en fonction de variables de taux décrivant les entrées et les sorties du stock au cours de l'intervalle séparant ces deux instants.
- C'est la structure globale du système, c'est-à-dire les interactions entre ses différents stocks par l'intermédiaire des taux qui agissent sur eux qui détermine le comportement dynamique du système. Ces interactions peuvent conduire à des phénomènes de croissance (ou de décroissance) cumulative lorsqu'elles se renforcent mutuellement, ou à des comportements de stabilisation, d'amortissement lorsqu'elles se compensent les unes les autres. Les premières formes sont appelées boucles de rétroaction (*feedbacks*) positives, les secondes, boucles de rétroaction (*feedbacks*) négatives.

-
- Les systèmes humains complexes ont des comportements souvent contre-intuitifs. Ils ne réagissent pas toujours à nos actions de la façon prévue. Cela tient d'une part à la complexité des relations de feedbacks qui les composent et, d'autre part, à un phénomène généralement sous-estimé et auquel la dynamique des systèmes attache une importance considérable : les délais de réaction et d'information. Entre le moment où une décision est prise et celui de son implémentation, il s'écoule un délai plus ou moins long qui peut faire en sorte que le système se trouve dans un état tout à fait différent de celui qui était le sien au moment de la décision et rendre celle-ci inadéquate. De même, il peut y avoir décalage entre l'état du système réel et l'information que nous en avons, celle-ci pouvant correspondre à un état antérieur du système (un peu comme la lumière des étoiles qui met parfois des centaines d'années à nous parvenir et nous parle d'un astre déjà éteint).

Cette méthode et cette philosophie (les « forrestériens » n'hésitant pas à parler, à propos de la DS d'une « new view of the world ») ont été appliquées par Forrester lui-même à la dynamique managériale et industrielle¹⁶, à la croissance urbaine (Forrester, 1969), à l'exploration des limites environnementales de la croissance démographique et industrielle mondiale (Forrester, 1971). C'est ce dernier modèle qui a été amplifié par ses élèves Dennis et Donella Meadows (entre autres) pour le célèbre rapport au Club de Rome « halte à la croissance » (Meadows *et al.* 1972).

La dynamique des systèmes, après avoir connu un succès foudroyant, connut une longue traversée du désert suite aux nombreuses critiques adressées principalement par les économistes aux modèles du monde qu'elle a inspirés. Actuellement, elle semble retrouver une deuxième jeunesse avec la problématique du développement durable et la prise en compte des questions environnementales. Il existe une société (*System Dynamics Society*) pour la promotion et le développement de la SD et une revue lui est entièrement consacrée, la *System Dynamics Review*.

3.9.3 Domaines privilégiés d'application

A priori, la SD n'a pas de domaine privilégié d'application : on a vu des modèles de DS dans des domaines aussi variés que la théorie freudienne du refoulement, les interactions entre prédateurs et proies, la problématique de la drogue, la gestion des stocks industriels, l'organisation des systèmes de santé, la planification ou l'analyse de la politique énergétique (les modèles FOSSIL et FREE, principalement), etc.

3.9.4 Atouts et faiblesses

Un des atouts de la méthode est précisément son extrême flexibilité : tout système dynamique peut être représenté (au moyen des diagrammes de flux créés par Forrester) et simulé aisément grâce à la présence sur le marché de logiciels conviviaux et relativement peu chers qui mettent la méthode à la portée de tous : DYNAMO, STELLA, VENSIM étant les plus connus.

Par ailleurs, la formalisation en termes de stock et flux, l'analyse des rétroactions positives et négatives et les concepts de stabilité, cycles limites, oscillations, etc., constituent une boîte à outils transdisciplinaire qui permet à des spécialistes de disciplines différentes de collaborer

¹⁶ L'appellation initiale de la méthode était d'ailleurs « industrial dynamics ». Cfr. Forrester (1964).

aisément autour d'un même projet. Il s'agit sans doute donc d'un outil privilégié pour l'évaluation intégrée (*Integrated Assessment*).

Cette flexibilité est aussi à la base de nombreuses erreurs qui ont été commises dans le champ de la DS, où trop souvent les modélisateurs se sont lancés dans la construction de modèles complexes sans disposer des connaissances disciplinaires minimales pour construire des représentations scientifiquement acceptables des différents systèmes modélisés. C'est ainsi, par exemple, que les nombreuses erreurs de modélisation des variables économiques dans les modèles du monde World 2 et World 3 (absence de prix, choix d'une fonction de production interdisant toute substitution entre facteurs, etc.) construits pour le Club de Rome auraient pu facilement être évitées si l'équipe (essentiellement des ingénieurs et des écologistes) s'était adjoint un économiste à la fois compétent et suffisamment ouvert pour accepter de couler dans le langage de la DS ses connaissances disciplinaires.¹⁷

Ils sont, en revanche, extrêmement gourmands en données et, comme celles-ci manquent généralement, tant leur identification que leur estimation relève en général davantage du bricolage que d'une méthodologie stricte. En fait, il n'existe pas de méthode réellement satisfaisante¹⁸ pour estimer de façon rigoureuse les très nombreux paramètres qui caractérisent la plupart des modèles de DS et ce travail s'assimile souvent à des « educated guesses ». Or, contrairement à ce qu'affirmait Forrester, et que croient la plupart des tenants de cette approche, les modèles de ce type peuvent être extrêmement sensibles aux valeurs des paramètres et des stocks à l'initialisation.

Signalons que des modèles de DS peuvent être associés à d'autres formes de modélisation, comme par exemple dans le CELSS (Coastal Ecological Landscape Spatial Simulation), le modèle construit par Constanza *et al.*, et qui se présente sous la forme de 2 479 cellules interconnectées représentant une portion de territoire, chacune d'entre elle étant modélisée comme un système dynamique au moyen du logiciel STELLA de DS (Maxwell et Constanza, 1994).

Les modèles de DS ont évidemment joué un rôle majeur dans le processus qui a conduit à la notion de développement durable et constituent toujours, aux dires de Meadows *et al.*(1992) et Randers (2000) un instrument privilégié pour l'aborder.

¹⁷ Peut-être était-il simplement impossible de trouver ces deux qualités confondues chez les économistes de l'époque ? Rappelons cependant que K. Boulding avait déjà, à ce moment, présenté une vision systémique de l'économie.

¹⁸ Les tentatives pour encourager l'usage de méthodes comme le filtre de Kalman dans l'estimation des modèles de DS n'ont guère été fructueuses, sans doute parce que celle-ci nécessite, pour donner des résultats satisfaisants, des séries chronologiques suffisamment longues.

3.9.5 Matrice et commentaires

Tableau 9. La matrice M.C pour les modèles de dynamique des systèmes

Caractéristiques de durabilité	Respect du critère	Commentaires
1. Interdisciplinarité	1,5	L'adoption d'une théorie transdisciplinaire (la systémique) facilite la construction de modèles authentiquement interdisciplinaires. Encore faut-il que les disciplines soient suffisamment avancées pour permettre la représentation de leur objet dans le langage des systèmes dynamiques
2. Intergénérationnalité	1,5	Les modèles de DS se prêtent bien à la représentation du long terme. De surcroît, il est aisé d'y représenter la population sous la forme de générations imbriquées, permettant une véritable « comptabilité intergénérationnelle ».
3. Incertitude	-0,5	Les modèles de DS sont fondamentalement déterministes. La seule façon de prendre en compte l'incertitude consiste à produire des scénarios multiples en faisant varier les paramètres. Il s'agit alors, en fait, de tests de sensibilité et ces tests portent rarement sur l'ensemble des paramètres. Par ailleurs, la structure du modèle est toujours invariable.
4. Participation	1,5	L'existence de logiciels conviviaux et la représentation graphique de la structure du modèle et des équations permet une participation des <i>stakeholders</i> à la construction du modèle et des scénarios. Les praticiens de la méthode ont toujours mis l'accent sur l'importance de cette construction commune du modèle.
5. Local / global	0,5	Les plus célèbres – mais peut-être pas les meilleurs exemples – des modèles de DS sont précisément des modèles planétaires. Leur caractère exagérément agrégé a été critiqué à juste titre, mais rien ne s'oppose à la construction de modèles planétaires plus désagrégés.

Chapitre 4. Analyse des thématiques et problématiques

4.1 Introduction

Ce chapitre expose l'analyse des deux thématiques, l'énergie et l'aménagement du territoire, et de leurs problématiques, à l'aune du développement durable.

Pour rappel, l'objectif de cette recherche est d'identifier les approches scientifiques susceptibles de renouveler la pratique de l'aide à la décision en matière de développement durable, et tout spécialement en matière de modélisation. Dans un premier temps, les critères que devraient nécessairement respecter ces approches ont été arrêtés : l'étape actuelle consiste à confronter les deux problématiques sus-mentionnées à ces critères.

À cet effet, l'objet est ici double : d'une part, décomposer ces thématiques globales en autant de problématiques pertinentes d'un point de vue de développement durable ; d'autre part, identifier les exigences précises pour la modélisation en termes d'interdisciplinarité, d'intergénéralité, d'incertitude, de « glocalité » (local/global) et de participation dans ces matières, ce qui rejoint mes cinq critères arrêtés en début de projet.

Ce faisant, on espère d'abord pouvoir mieux évaluer la pertinence des cinq critères retenus pour l'appréhension de problèmes plus concrets de développement durable et, ensuite, se doter d'un cadre opérationnel permettant d'évaluer le potentiel en terme de développement durable des formes de modélisation les plus pratiquées dans ces contextes. Autrement dit, sachant quels sont les domaines qu'il est nécessaire de prendre en compte et avec quel degré d'interdisciplinarité, d'attention à l'aléatoire ou à l'incertitude, etc., c'est-à-dire quels sont les *besoins* d'une gestion en termes de développement durable dans telle ou telle thématique, on pense pouvoir être mieux à même de juger de l'adéquation de l'offre en matière de modélisation à ces besoins et de dégager des pistes susceptibles de l'améliorer.

La note est organisée de la manière suivante. La matrice générique est d'abord exposée. Ensuite les deux thématiques sont analysées l'une après l'autre.

4.2 La matrice problématiques - critères

La matrice suivante présente le croisement pour N problématiques associées à une thématique donnée avec les critères en fonction de leurs enjeux du point de vue du développement durable.

	Interdisciplinarité	Intergénérationnalité	Incertitude	Participation	Local/global
Problématique 1					
Problématique 2					
..					
..					
Problématique N					

Pour rappel, on indique le degré d'adéquation de chaque critère à la problématique considérée à l'aide d'une « cote » :

- « + » : adéquation forte
Exprime le fait que la problématique nécessite la prise en compte du critère ;
- « - » : adéquation faible
Indique que le critère est utile à une bonne appréhension de la problématique mais qu'il l'est moins que les critères cotés « + » ;
- « 0 » : adéquation absente
Indique que la problématique ne requière pas nécessairement la prise en compte de ce critère ; cette option est donc parfois caricaturale et elle ne préjuge pas du fait que ce critère pourrait être incorporé sous une forme ou une autre.

Cette codification est volontairement restreinte : des commentaires doivent donc accompagner cette matrice pour en justifier la cotation.

La difficulté méthodologique est d'ici de parvenir à attribuer la cote « 0 » à certains critères afin de mettre en évidence le caractère crucial de certains autres. La matrice doit pouvoir être discriminante.

Il faut remarquer que, suivant la problématique considérée, certains critères peuvent être complémentaires (mettre un « + » à l'un suggère de mettre un « + » à l'autre) tandis que d'autres sont plutôt substitués et jouent comme des vases communicants, notamment parce qu'un argument utilisé pour l'un ne peut pas être repris pour l'autre (mettre un « + » à l'un suggère alors de mettre un « - » à l'autre).

Un certain nombre de précautions doit être respecté avant d'analyser cette matrice plus en détail pour les deux thématiques considérées.

En premier lieu, l'analyse de la matrice doit se faire simultanément en ligne et en colonne afin de se faire une idée des enjeux des différentes problématiques en terme de développement durable. L'analyse est davantage pertinente en termes relatifs (d'une problématique par rapport à une autre) qu'en termes absolus.

Les symboles indiqués dans chaque case sont éminemment difficiles à arrêter : leur objet essentiel est la discussion et la prise de conscience des caractéristiques les plus importantes, du point de vue du développement durable, au sein de chaque problématique et dans le contexte de la thématique considérée (l'énergie, ici). On s'est efforcé d'exclure le plus possible afin de ne garder que les critères les plus pertinents et d'éviter de répéter que « tout est dans tout », ce qui est évident. Nos choix sont donc foncièrement discutables et nous essaierons de les étayer autant que possible dans la suite de ce rapport.

Inévitablement, cette matrice prêtera donc à discussion, ce qui est presque son objectif : ces discussions permettront d'améliorer la connaissance et la perception que se font les différents acteurs de ses propriétés et de ses usages potentiels. En appliquant notre propre méthodologie à cette étude, le remplissage de cette matrice devrait normalement être réalisé en concertation avec le Comité d'accompagnement du projet ou même avec un panel plus large, mais cela déborde le cadre fixé pour ce projet.

4.3 La thématique de l'énergie

Les questions énergétiques globales ont donné lieu à un certain nombre de travaux détaillés (WETO (2002), EJIG (2001)...), mais malheureusement sans relation formelle avec les enjeux du développement durable. En respectant notre cadre méthodologique, nous allons d'abord ici exposer les différentes facettes de cette thématique (les *problématiques*), puis nous chercherons à identifier les liens qu'entretiennent ces différentes problématiques énergétiques avec le développement durable. Les problématiques considérées sont les suivantes : épuisement des ressources énergétiques, nucléaire, énergies renouvelables, accès, changement climatique, utilisation rationnelle de l'énergie et santé. Enfin, nous discuterons les réactions et opinions émises par le Comité d'accompagnement lors de la Table ronde.

4.3.1 Organisation de la discussion avec le Comité d'accompagnement

Lors de la réunion du 31 janvier 2003, les membres du Comité d'accompagnement du projet ont été amenés à participer à cette analyse, pour les deux thématiques concernées par l'étude. Pour les chercheurs, bénéficier des réactions et commentaires de ces membres était particulièrement intéressant pour le simple motif que cette étape de la méthodologie se caractérise par son caractère éminemment subjectif mais, en même temps, requiert une bonne connaissance de la problématique.

La mise en place de la discussion a été organisée de deux manières :

- en invitant les membres du Comité d'accompagnement à produire leur propre analyse ;
- en leur présentant notre analyse et en la confrontant à la leur.

La discussion a ainsi pu être menée de manière constructive pour les chercheurs (bénéficiant d'interlocuteurs avancés dans la même réflexion avec une base méthodologique commune) et pour les membres du Comité. Une information de base sur la méthodologie leur avait été

envoyée préalablement (c'est-à-dire une version provisoire des chapitres précédents de ce rapport) ainsi que les matrices vierges afin qu'ils puissent, de leur côté, se livrer à l'exercice.

La cette codification proposée en « + », « - » et « 0 » est volontairement restreinte et des commentaires avaient été demandés pour accompagner cette matrice pour en justifier la cotation. La difficulté méthodologique principale (pour ne pas dire la barrière psychologique principale) est d'attribuer la cote « 0 » à certains critères (signifiant qu'ils ne sont pas pertinents pour l'analyse de la problématique considérée), et ce afin de mettre en évidence le caractère crucial de certains autres : la matrice doit pouvoir être discriminante.

Il avait été recommandé d'établir d'abord la matrice en ligne (c'est-à-dire : problématique par problématique), puis de la relire en colonne en se demandant : « du point de vue de ce critère, la cote est-elle justifiée pour cette problématique par rapport à telle autre problématique ? » En procédant ainsi, on a affaire à une analyse qui devient pertinente en termes *relatifs*, c'est-à-dire d'une problématique par rapport à une autre ou d'un critère par rapport à un autre. Ceci permet de corroborer les évaluations.

Les symboles indiqués dans chaque case sont éminemment difficiles à arrêter : leur objet essentiel est la discussion et la prise de conscience des caractéristiques les plus importantes du point de vue du développement durable, au sein de chaque problématique et dans le contexte de la thématique considérée. Il faut s'efforcer d'exclure le plus possible afin de ne garder que les critères les plus pertinents et d'éviter de répéter que « tout est dans tout », ce qui est évidemment trivial. Chaque choix étant foncièrement discutable, il était donc suggéré à chacun d'ajouter quelques éléments d'explication, conjointement à la matrice. Il avait été signalé que, suivant la problématique considérée, certains critères peuvent être considérés comme complémentaires (mettre un « + » à l'un suggère de mettre un « + » à l'autre) tandis que d'autres sont plutôt substitués et jouent comme des vases communicants, notamment parce qu'un argument utilisé pour l'un ne peut pas être repris pour l'autre (mettre un « + » à l'un suggère alors de mettre un « - » à l'autre).

Inévitablement, l'élaboration de ces matrices prête donc à discussion, ce qui est finalement leur objectif : ces discussions permettent d'améliorer la connaissance et la perception que se font les différents acteurs de ses propriétés et de ses usages potentiels. L'analyse des commentaires et discussions sera exposée ci-dessous pour chacune des deux thématiques considérées.

Lors de la réunion du Comité d'accompagnement, seule la matrice pour la thématique de l'aménagement du territoire a pu être discutée, faute de temps. Par contre, une Table ronde a été organisée le 19 juin 2003, avec un nombre plus important de participants, pour travailler sur la thématique énergétique, mais de manière plus complète, c'est-à-dire incluant une réflexion sur les modèles (voir chapitre 5).

4.3.2 Une description des problématiques considérées

4.3.2.1 L'épuisement des ressources d'énergie non renouvelables

Cette problématique traite de la question de la raréfaction puis de l'épuisement des différentes énergies fossiles. Suivant le scénario de référence de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE), la demande primaire d'énergie devrait augmenter, au niveau mondial, de 1,7 % par an entre 2000 et 2030, soit un accroissement équivalent aux 2/3 de la consommation actuelle. Les combustibles fossiles resteraient la source primaire d'énergie principale, répondant à une grande partie de cet accroissement de demande : les combustibles fossiles fournissaient 88 % de l'énergie primaire en 1997 et pourraient représenter encore 86 % en 2020. La demande pour

le gaz naturel augmenterait plus fortement que pour les autres combustibles fossiles, ce gaz est aussi souvent préféré au charbon et au pétrole pour ses effets relativement moins négatifs sur l'environnement, spécialement en raison de son faible contenu en carbone. La consommation de charbon devrait néanmoins aussi augmenter, mais plus lentement que celle du pétrole et du gaz naturel.

Globalement, selon l'AIE, les ressources mondiales d'énergie seraient suffisantes pour rencontrer l'accroissement projeté de la demande... à l'horizon 2020.

Il est cependant essentiel d'agir dès maintenant pour s'adapter à la raréfaction prévue des différentes énergies fossiles. La taille et le nombre des gisements économiquement rentables augmentent bien évidemment avec le prix de la ressource (on peut supporter un coût de production (c'extraction) plus élevé s'il est possible de vendre la ressource à un prix supérieur). La raréfaction amènera très probablement une augmentation des prix des services énergétiques mais également, nécessairement, un épuisement de ces ressources énergétiques.

Depuis le contre-choc pétrolier de 1986, les efforts de maîtrise de l'énergie se sont très largement relâchés dans les économies industrialisées. Attendre une crise énergétique liée à l'épuisement des ressources fossiles ou à une altération du contexte géopolitique serait suicidaire car la rupture serait alors imposée par les événements, dans l'urgence et dans les pires conditions politiques et sociales qui soient. Anticiper est nécessaire, mais cela se fera inévitablement, à tout le moins en ce qui concerne la raréfaction, par les mécanismes de prix évoqués précédemment. La montée en puissance des sources d'énergie alternatives jouera évidemment un rôle crucial dans cette dynamique.

4.3.2.2 *Le nucléaire*

Les risques inhérents à l'industrie nucléaire énergétique sont liés d'une part à la gestion des déchets radioactifs, d'autre part à l'accroissement des risques inhérents à la prolifération des centrales à l'échelon mondial. Chez nous, les dangers sanitaires et environnementaux du nucléaire sont essentiellement dus à l'impasse actuelle en matière de stockage des déchets hautement radioactifs. La difficulté de trouver des sites de stockage en témoigne. En Europe, la politique engagée pour réduire les émissions de gaz à effet de serre conjuguée à l'élargissement de l'Union à des pays équipés de centrales nucléaires souvent anciennes ont mis en lumière un besoin objectif nouveau d'intervention communautaire dans ce secteur, indépendamment des choix de politique énergétique des Etats membres¹⁹.

Les risques liés à la prolifération sont de deux ordres. Le premier risque est lié à l'installation potentiellement de plus en plus facile (en raison de la maîtrise de la technologie, de la réalisation de petites unités et de la baisse des coûts) de centrales dans des zones à risque géopolitique élevé : la part du nucléaire dans la production mondiale d'électricité risque de s'accroître fortement, les risques d'incidents également. Par ailleurs, cette multiplication et cet éparpillement géographique des centrales nucléaires s'accompagnera d'une multiplication des flux de transports de combustibles, accroissant d'autant les risques d'incident. A titre d'exemple, sept des douze prochains pays adhérents à l'Union européenne disposent ensemble de 22 réacteurs nucléaires.

¹⁹ Commission Européenne, Vers une approche communautaire de la sûreté nucléaire dans l'Union, 01/2002, p. 1. (http://europa.eu.int/comm/energy/nuclear/pdf/new_package/memo_fr.pdf).

4.3.2.3 *Les énergies renouvelables*

Les énergies renouvelables sont certainement appelées à jouer un rôle croissant à moyen et long terme dans les scénarios énergétiques respectueux de l'environnement. À la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables ne se présentent pas sous forme de « gisement » : elles sont fugitives et fluctuantes dans le temps. Elles sont, en outre, diluées dans l'espace, difficilement stockables et transportables, du moins à l'état brut. Le potentiel mobilisable total (hors géothermie) pour l'an 2000 a été estimé à 3,3 Gtep, soit deux fois et demi celui mobilisé en 1990, une fois et demi la production mondiale de charbon ou encore 10% de plus que la production annuelle mondiale de pétrole²⁰.

En Belgique, bien que le potentiel hydroélectrique soit déjà fort exploité, sa part dans la production d'énergie reste négligeable étant donné la typographie du pays. La production d'énergie éolienne est également limitée en raison du manque d'espace ouvert exposé au vent ; le potentiel de développement pour l'énergie éolienne on-shore est donc limité. Néanmoins, l'exploitation éolienne off-shore pourrait contribuer de manière significative à l'objectif de 3 % de production d'électricité avec des sources d'énergie renouvelables en 2004. L'utilisation des autres sources renouvelables d'énergie, en particulier la biomasse, qui est actuellement insignifiante, pourrait au total représenter au moins 5 % de production d'énergie primaire.²¹

L'utilisation traditionnelle des sources d'énergie renouvelables (bois de chauffage) devrait s'effacer progressivement devant des conducteurs d'énergie de bonne qualité, notamment ceux des sources « nouvelles » renouvelables comme la biomasse, l'énergie solaire, éolienne et géothermique. L'énergie hydraulique et la biomasse traditionnelle sont déjà des éléments importants des diverses sources d'énergie à l'échelon mondial (environ 18 % du total), alors que les énergies renouvelables "nouvelles" ne représentent qu'environ 2 % de l'énergie primaire utilisée dans le monde. La part d'énergie renouvelable devrait seulement atteindre 3 % de l'énergie primaire en 2020 alors que l'on est actuellement à 2% de l'énergie primaire mondiale. Cependant, certaines analyses préliminaires dans les pays de l'OCDE indiquent, dans le cas de politiques volontaristes, une croissance spectaculaire jusqu'à 8%.²²

4.3.2.4 *L'accès aux services énergétiques*

Cette problématique renvoie à un double défi : (i) assurer une sécurité d'approvisionnement des populations, ce qui renvoie à la notion d'indépendance énergétique des pays ; (ii) assurer un accès équitable aux services énergétiques à toutes les couches de la population.

On constate que les réserves énergétiques fossiles sont globalement suffisantes à moyen terme mais que la concentration des réserves pétrolières dans un nombre restreint de régions du monde est à l'origine de questions géopolitiques qui ne pourront que se renforcer à l'avenir. De ce fait, la sécurité des approvisionnements en pétrole brut demeure une composante non négligeable des politiques de sécurité énergétique. Le concept de sécurité énergétique doit également prendre en compte la protection de l'environnement et la libéralisation du marché, ce qui passe notamment par la redéfinition du rôle de l'Etat, par la promotion de technologies

²⁰ Benjamin Dessus, *Energie : un défi planétaire*, Belin, Paris, 1999, p 46.

²¹ Federal department of the environment studies and coordination office, *Belgium's Third National Communication under the United Nations Framework Convention on Climate Change*, 04/2002, pp. 29-30.

²² IEA-AIE, *Toward a sustainable energy future*, Paris 2001, p. 132.

propres et par la poursuite de mesures d'efficacité énergétique. Promouvoir l'assistance technique et le transfert de technologies avec les pays en développement est également nécessaire. L'approvisionnement des parties défavorisées de la population mondiale est loin d'être assuré actuellement, aussi bien dans les pays dits développés que dans les pays en développement.

Le nombre de personnes sans électricité est aujourd'hui de 1,6 milliard c'est-à-dire que 27% de la population mondiale n'a pas accès aujourd'hui à l'électricité.²³

4.3.2.5 Le changement climatique

La problématique du changement climatique renvoie aux coûts économiques, sociaux et environnementaux d'une modification *dangereuse* du climat, en vertu de l'article 2 de la Convention cadre sur les changements climatiques.

Les gaz à effet de serre les plus importants sont la vapeur d'eau (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂), l'ozone (O₃), le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O).

Du point de vue sectoriel, dans nos pays, les principaux émetteurs de CO₂ sont l'industrie, le transport, la production d'électricité et le secteur résidentiel.

La combustion des énergies fossiles constitue donc l'un des vecteurs d'émission des gaz à effet de serre les plus importants.

4.3.2.6 Utilisation Rationnelle de l'Energie

L'Utilisation Rationnelle de l'Energie (URE) vise à réduire la consommation, soit par des mesures d'économies, soit en faisant des choix plus judicieux en équipements performants. Les stratégies d'efficacité et de diversification énergétiques sont, à terme, doublement gagnantes. Elles se révèlent en effet moins onéreuses que la poursuite des tendances actuelles et sont bénéfiques pour l'environnement. Il y a donc une synergie entre la croissance économique et la protection de l'environnement.

Les coûts d'accès aux réserves d'économie d'énergie réalisables dans le domaine de l'électricité sont du même ordre de grandeur que les coûts d'investissement pour les centrales électriques. Toutefois, aucune dépense n'étant envisagée pour le combustible ou pour l'installation du réseau, les coûts d'accès aux réserves d'économie d'énergie sont en définitive nettement plus faibles (entre deux et quatre fois moins plus avantageux).

Une plus grande efficacité énergétique aura un effet de levier sur l'offre. L'efficacité globale de l'union européenne n'est que de 25%. Par exemple, lorsqu'on produit de l'électricité, le rendement énergétique n'est que de la moitié au grand maximum. En amont, il faut aussi de l'énergie pour produire et acheminer le combustible. En aval, on a des pertes sur le réseau électrique. De plus, les technologies d'économie d'énergie sont fort peu utilisées dans le secteur du bâtiment, par exemple. Une unité d'énergie finale non consommée, c'est donc en réalité quatre unités économisées²⁴.

²³ Traduit de IEA-AIE, World Energy Outlook 2002, Paris 2002, p 373.

²⁴ Commission européenne, Energie, maîtrisons notre dépendance, Communautés européennes, Belgique, 2002, p.26.

On estime qu'un potentiel d'amélioration de l'efficacité énergétique de plus de 18 % de la consommation actuelle serait exploitable dans l'UE, en raison des barrières commerciales qui entravent une diffusion satisfaisante des techniques destinées à accroître l'efficacité énergétique et le recours à une utilisation efficace de l'énergie²⁵.

4.3.2.7 Santé et pollution

La santé comporte de nombreuses dimensions, certaines objectives, d'autres plus subjectives. Les variations de qualité de l'environnement peuvent affecter les individus de multiples façons, allant d'une variation de la fréquence du rhume ou de symptômes d'irritation à l'accroissement du risque de contracter une affection mortelle. Les populations humaines sont exposées par inhalation, par ingestion des aliments à un nombre considérable de polluants toxiques. La pollution de l'air urbain se traduit par une croissance des cas de bronchites chroniques et de cancer des voies respiratoires. L'énergie joue donc un rôle important dans ces catégories d'impacts sur la santé²⁶.

De nombreuses études épidémiologiques ont montré que la dégradation de la qualité de l'air des villes influe sur la mortalité et la morbidité des populations urbaines.

Par exemple, outre une influence synergiste du SO₂, des NO_x, de l'ozone, et des particules, il a été mis en évidence le rôle particulièrement nocif des fumées noires des véhicules diesel sur les hospitalisations dues à des crises d'asthme aigu. En 1953, on a ainsi attribué 3 000 décès liés au grand *smog* de Londres qui a sévit pendant une semaine en décembre de cette année-là. En France, on a établi que la pollution acide-particulaire est directement responsable de 260 à 350 décès par an à Paris et de 30 à 50 par an à Lyon. Les effets sur la morbidité sont encore plus considérables.

Le bénéfice social d'une réduction de 10 % du SO₂, du NO₂, du O₃ et du PS₁₃ est situé entre 7,6 et 15,2 MEURO en Ile-de-France si l'on ne compte que la morbidité.²⁷

²⁵ Commission des communautés européennes, Plan d'action visant à renforcer l'efficacité énergétique dans la Communauté européenne, Bruxelles, 2000, p. 2.

²⁶ F. Ramade, Dictionnaire encyclopédique des pollutions, Ediscience international, Paris, 2000, pp. 422-423.

²⁷ Economie Publique, études et recherches, Méthodes d'évaluation économique des biens environnementaux, Edition De Boeck Université, Bruxelles, 1998, p. 206.

4.3.3 Une analyse de la matrice par problématique (en ligne)

La matrice constituée pour la matrice énergétique est la suivante.

Tableau 10. La matrice C.P pour la thématique de l'énergie

	Interdisciplinarité	Intergénérationnalité	Incertitude	Participation	Local/global
Ressources épuisables	-	+	-	0	-
Nucléaire	+	+	+	+	-
Ressources renouvelables	-	+	0	+	-
Accès aux services énergétiques	-	0	-	-	+
Changement climatique	+	+	+	-	+
Utilisation rationnelle	+	-	0	+	-
Santé	+	0	-	0	+

Ci-dessous, cette matrice est analysée par problématique (en colonne), mais elle pourrait évidemment l'être par critère (en ligne : voir les remarques préliminaires). Des considérations transversales seront donc fréquentes et une analyse comparative en ligne terminera cette analyse afin de recouper les cotations déterminées entre les différentes problématiques.

4.3.3.1 Ressources énergétiques épuisables

La notion de « gisement » est à l'intersection de nombreuses disciplines pour plusieurs motifs :

1. le gisement est une notion à la fois économique (ce gisement doit être rentable) et technologique (il doit être accessible) ; la taille des gisements augmente donc lorsque le prix de vente de la ressources en question s'accroît, sous respect des contraintes géologiques, bien entendu ;
2. le gisement est tributaire des limites technologiques d'exploitation (un bon exemple est fourni par l'hydraulique ou l'éolien, tributaires des caractéristiques topographiques d'un territoire).

Le critère intergénérationnel est évident puisque tout épuisement d'une ressource la rend définitivement indisponible pour les générations futures. Une certaine valeur d'option pourrait donc être attachée à cette ressource, en plus de sa rente de rareté. Cette valeur d'option reflèterait la valeur attachée, pour la génération actuelle, à une disponibilité future de cette ressource par les générations futures. Faire durer une ressource dans le temps présent (c'est-à-dire la rendre « un plus rare » pour notre génération, autrement dit l'économiser) peut procurer une valeur du fait que l'on en préserve l'exploitation pour les générations futures. La génération actuelle pourrait être prête à sacrifier une partie de sa consommation actuelle (perte à valoriser à la rente de rareté) pour permettre aux générations futures d'en bénéficier (bénéfice pour la génération actuelle équivalente à la valeur d'option).

Le critère d'incertitude est présent par la dimension exploratoire des gisements technologiquement et économiquement exploitables : l'évolution des techniques peut rendre accessibles certains gisements autrefois inaccessibles, et ce à la fois du point de vue purement technique et du point de vue des coûts d'exploitation (voir le critère d'interdisciplinarité).

Le critère participatif est sans doute le moins opérant pour cette problématique. Les conditions *sine qua non* de rentabilité économique et technologique prédominent certainement : dans un contexte historique, on pourra remarquer que l'énergie constitue une ressource stratégique, mais on est alors loin du critère participatif retenu dans notre étude. Généralement, l'offre gère la pénurie et, grâce à la rente de rareté ainsi générée, oriente les modes de consommation : la dimension participative n'interviendrait que si l'offreur d'une ressource épuisable était public, ce qui n'est pas le cas (les ressources sont privativement appropriées par des pays ayant toute souveraineté sur ces ressources). La problématique de l'accessibilité intégrera, par contre, une forte dimension participative (*cf. infra*). A moins de considérer ce critère sous une dimension géostratégique, il ne s'applique donc pas à la problématique des ressources épuisables.

Le critère local/global intervient dans le sens où l'épuisement d'une ressource la rend indisponible pour l'ensemble de ses consommateurs potentiels, à quelque échelon temporel, décisionnel ou spatial que ce soit. Chacun est donc collectivement responsable mais aucun n'a intérêt à restreindre sa propre consommation : on a ici les caractéristiques d'un bien collectif (*à préciser...*) et donc un lien entre valeur d'option et rente de rareté (voir ci-dessus). En outre, ce qui justifie le « + », les impacts locaux de l'épuisement d'une ressource peuvent être également très importants pour une région ou un pays, notamment pour un pays ne disposant que de cette unique source de devises.

4.3.3.2 L'énergie nucléaire

A l'instar des énergies épuisables ou renouvelables, et pour la même catégorie de motifs, la question du nucléaire est évidemment interdisciplinaire. En particulier, on retrouve ici le fait que la rentabilité économique relative de cette énergie est tributaire de son coût d'exploitation par rapport aux autres énergies des autres énergies. La complexité des questions relatives au nucléaire suggère que ce critère est relativement important : une bonne appréhension de ces questions requière l'analyse conjuguée de physiciens, géologues, économistes, épidémiologistes, chimistes...

La dimension intergénérationnelle est particulièrement présente, à la fois par les dimensions impacts et déchets : les décisions actuelles auront des répercussions sur les générations futures, même en l'absence d'accident nucléaire civil : démantèlement des centrales actuelles, remplacement par d'autres sources énergétiques, gestion des déchets radioactifs.

L'incertitude est présente sous plusieurs point de vue : la gestion du risque lié à la production d'énergie nucléaire et celle de la conservation des déchets à durée de vie longue. Dans les deux cas, des risques technologiques existent ; dans le second cas, une supputation sur les techniques

de recyclage à venir est nécessaire. L'incertitude en matière nucléaire porte donc essentiellement sur les techniques de production et de recyclage des déchets et sur leurs avancées. La question du risque est particulière et se caractérise (dans nos pays industrialisés) par une probabilité d'incident faible mais des dommages présents et futurs très importants. On comprend pourquoi la prolifération des centrales est synonyme d'accroissement objectif du risque.

Le critère participatif rencontre ici un contexte historique particulier. Les choix en faveur du nucléaire ont généralement été dictés de manière non participative dans nos pays, mais elle a souvent rencontré une opposition populaire n'hésitant pas à s'exprimer. Ce qu'on appelle « la sortie du nucléaire », en Belgique, a en outre fait l'objet d'une loi discutée devant le Parlement. La dimension NIMBY (*not in my backyard*) du nucléaire est donc importante, ce qui rend le critère participatif décisif pour l'analyse de cette problématique. L'acceptabilité sociale de l'énergie nucléaire constitue un enjeu particulièrement sensible qui ne peut probablement être résolu que par une approche fortement participative²⁸.

Même si elle est importante, la dimension locale / globale ne nous semble pas particulièrement névralgique ou caractéristique de cette problématique, même si une pollution locale d'origine nucléaire est susceptible d'avoir des répercussions globales importantes (à la fois, tant dans le temps que dans l'espace).

4.3.3.3 Les énergies renouvelables

La dimension interdisciplinaire est présente au même titre que pour la problématique « épuisement des ressources », et notamment pour les mêmes motifs de rentabilité économique. De surcroît, les énergies renouvelables font souvent appel à des disciplines inhabituelles en matière de production d'énergie (pensons à la biomasse, aux biocarburants...).

L'intergénéralité constitue un critère particulièrement opérant : dès qu'une ressource renouvelable est physiquement et commercialement disponible, elle l'est également pour les générations futures. Seuls son taux de diffusion parmi les énergies existantes (épuisables) et son taux de disponibilité peuvent être sujets à discussion. Le critère d'intergénéralité est donc par essence impliqué dans cette problématique.

Le critère d'incertitude semble moins pertinent, si ce n'est sur les questions d'opérationalité technico-économique de ces sources d'énergie.

Par contre, il nous semble que la dimension participative est davantage importante dans la mesure où les énergies renouvelables constituent généralement une offre décentralisée (à l'exception de l'énergie hydraulique). Par exemple, l'énergie éolienne ne fonctionne que lorsqu'il y a suffisamment de vent : que font les consommateurs tributaires de cette source énergétique lorsque ce n'est pas le cas ? Il en va de même pour l'énergie solaire. En outre, ces sources de production sont nombreuses et éparpillées sur le réseau, voire même non connectées au réseau. Une prise en considération particulière des facteurs de la demande est donc nécessaire et l'offre doit s'adapter à ces caractéristiques, à la fois du point de vue de la quantité d'énergie et de sa nature.

²⁸ Voir à ce sujet la position d'André Berger dans une lettre ouverte au Premier Ministre (La Libre du 15/01/03) ainsi que la réaction de Th. Bréchet, H. Tulkens et V. Van Steenberghe (L'Echo du 21/01/03 et La Libre du 20/01/03).

Dans le prolongement du critère participatif, une prise en considération du critère local / global est nécessaire mais, à notre point de vue, non névralgique : en décentralisant l'offre de services énergétique, les énergies renouvelables rendent néanmoins nécessaire une évaluation des implications globales des décisions adoptées localement.

4.3.3.4 L'accès aux services énergétiques

Sur base des éléments analysés précédemment, l'accès aux services énergétiques comporte une dimension interdisciplinaire non négligeable inhérente aux caractéristiques des différentes sources énergétiques disponibles. La double question de l'indépendance énergétique d'une population et d'un accès équitable pour toutes les catégories de cette population à cette offre énergétique est à mettre en relation avec les différents types de production envisageables et leurs critères de disponibilité physiques et économiques.

Le critère d'intergénéralité est peu opérant du point de vue de cette problématique dans le sens où rendre un service accessible à une génération donnée n'en assure pas la disponibilité pour les générations futures. Il en va de même pour la question de l'indépendance énergétique.

L'incertitude, par contre, rencontre les risques liés aux approvisionnements stratégiques, tant à l'échelon des pays que des communes, des entreprises ou des particuliers. Les incertitudes et risques associés à ces approvisionnement vont à la fois dans le sens des questions géostratégiques et du choix des structures d'offre énergétique.

Les deux critères les plus pertinents restent probablement la participation et le local / global. Les choix opérés à l'échelon global ou centralisé (l'Etat, par exemple) doivent tenir compte des conditions de demande des catégories de la population et de leur besoins vitaux, ce qui nécessite l'intégration d'une dimension d'équité dans les choix opérés. La participation doit permettre de définir et d'exprimer ces besoins à tous les échelons ainsi que de justifier globalement les choix opérés du point de vue de leur équité. L'articulation avec le critère local / global coule donc de source.

4.3.3.5 Changement climatique

La problématique du changement climatique est certainement l'un des meilleurs exemples de problématique de développement durable. Pour preuve, il a été très difficile d'exclure l'un de nos critères tant chacun joue ici un rôle névralgique.

Le critère interdisciplinaire est évident puisque le changement climatique est à la rencontre entre l'économie et la climatologie pour la partie « changements » et à la rencontre entre la climatologie et l'économie pour la partie « impacts », étant entendu que bien d'autres disciplines viennent s'intercaler entre les deux : physique, ingénierie, sociologie, chimie, biologie, agronomie, etc. Toutes les composantes de nos modes de consommation et de production sont en outre impliquées.

Le critère intergénéralité est également évident : les coûts économiques, environnementaux et sociaux du changement climatique n'apparaîtront qu'à moyen et long, voire très terme (voir les travaux de l'IPCC) tandis que les coûts (économiques et sociaux) de réduction des émissions sont à supporter pour les générations actuelles ou prochaines : une politique de lutte contre le changement climatique ne peut donc se justifier que dans une optique intergénéralité. A court terme, les coûts (économiques) l'emporteront toujours sur les bénéfices (environnementaux) et la prise en considération d'une certaine équité intergénéralité constitue donc une condition *sine qua non* à toute prise de décision.

L'incertitude est également partie intégrante de cette problématique. La relation entre température moyenne et altérations du climat sont de l'ordre de l'expertise et les marges d'incertitude demeurent en la matière très importantes.

Le critère participatif est sans doute le moins décisif dans cette problématique, même s'il est évident que le changement climatique est le résultat de décisions individuelles et même si le processus enclenché sous l'égide de la Convention climat est l'un des meilleurs exemples de collaboration internationale en matière environnementale. La Convention-cadre pourrait, à cet égard, être davantage considérée comme l'émergence d'un supra-gouvernement organisé sous l'égide des Nations Unies plutôt que comme un véritable processus participatif.

Enfin, le critère local / global est certainement essentiel de par la nature du changement climatique : vu les différents échelons décisionnels en jeux (locaux, régionaux, nationaux et supra-nationaux), chaque niveau décisionnel est amené à jouer son rôle, mais rien ne peut se faire sans concertation avec le niveau de concertation le plus élevé (risque de *free rider*).

4.3.3.6 Utilisation rationnelle de l'énergie

La question de l'utilisation rationnelle de l'énergie (URE) est un peu particulière ici car elle est la seule problématique jouant sur la demande énergétique, toutes les autres jouant sur la nature ou la structure de l'offre ou sur les impacts des modes de consommation énergétique.

L'utilisation rationnelle de l'énergie consiste à exploiter les mesures de réduction de la consommation d'énergie qui sont rationnelles du point de vue de leur rentabilité sociale. Le calcul d'un véritable gain net social (c'est-à-dire à la fois environnemental et économique) étant difficile, on se contente souvent d'une simple rentabilité économique.

L'analyse et la mise en oeuvre d'une utilisation rationnelle de l'énergie exige une appréhension fortement interdisciplinaire des barrières à sa mise en oeuvre, barrières qui peuvent être autant technologique qu'économiques, informationnelles ou psychosociologiques.

Le critère d'intérogénéralité est présent dans la mesure où toute joule (ou Tep) économisée aujourd'hui représente une consommation disponible pour demain, pour une offre donnée d'une ressource épuisable. Le jour où la consommation énergétique dépendra essentiellement des énergies renouvelables, la question des économies d'énergie se posera évidemment dans des termes très différents.

Le critère d'incertitude ne recouvre ici que l'incertitude sur la pénétration des technologies permettant de produire des énergies renouvelables. Aucun facteur risque vraiment spécifique ne peut être associé à cette problématique.

Le critère participatif est par contre très important car la mise en oeuvre des mesures d'économie d'énergie ne peuvent se faire que par une prise de conscience des différents acteurs (privés et publics, d'ailleurs) de leur potentiel d'utilisation rationnelle de l'énergie. Un renforcement de la communication et un dépassement des barrières psychologiques sont notamment nécessaires, ce qui ne peut être réalisé que par une implication étroite des différents acteurs impliqués, c'est-à-dire tous.

Enfin, le critère local / global reste important, en relation avec le poids de ce même critère pour les problématiques des énergies épuisables et renouvelables et pour le nucléaire : l'économie d'un joule d'énergie aujourd'hui a des répercussions sur les échelons locaux et globaux grâce à ce qui n'est pas produit ou consommé.

4.3.3.7 Santé et pollution

La dimension interdisciplinaire est évidente pour cette problématique : une bonne connaissance des types de polluants, de leur diffusion, de leurs impacts sur la santé humaine et du coût social d'une morbidité accrue relève d'une connaissance interdisciplinaire (le projet ExternE de la Commission européenne constitue l'un des meilleurs exemples en la matière).

Par contre, il est patent que les impacts sur la santé ont peu ou pas d'enjeux sur les considérations intergénérationnelles, compte tenu du type d'impacts considérés.

L'incertitude existe dans la mesure où l'évaluation des impacts reste toujours entachée de fortes incertitudes scientifiques et d'un facteur risque élevé, mais elle ne constitue pas un critère déterminant. Quant à la dimension participative, elle n'est guère opérante ici.

Enfin, le critère local / global est important car certaines pollutions peuvent exercer leurs effets loin de leur source d'émission (l'ozone troposphérique, par exemple).

4.3.4 Une analyse de la matrice par critère (en colonne)

Cette matrice vient d'être constituée en ligne : une analyse de la matrice en colonne permet de valider ou de reconsidérer certains choix opérés précédemment et de s'assurer, ainsi, de la cohérence des points de vue relatifs aux différents critères pour chaque problématique.

- Pour le critère d'interdisciplinarité, on constate que un « + » a été octroyé au nucléaire, au changement climatique, à l'URE et à la santé tandis qu'un « - » a été octroyé aux ressources épuisables, aux renouvelables et à l'accès aux services énergétiques.
- Pour le critère d'intergénérationnalité, un « + » ont été donné aux ressources épuisables, au nucléaire, aux ressources épuisables et au changement climatique tandis qu'un « - » a été donné à l'accès aux services énergétiques et un « 0 » à l'URE et à la santé.
- Pour le critère de l'incertitude et du risque, un « + » a été donné au nucléaire et au changement climatique, un « - » aux ressources épuisables, à l'accès aux services énergétiques et à la santé, un « 0 » aux renouvelables et à l'URE.
- Pour le critère de la participation, un « + » a été octroyé au nucléaire, au renouvelables, à l'accès aux services énergétiques et à l'URE. Le seul (petit) « - » revient au changement climatique tandis qu'un « 0 » est attribué aux ressources épuisables et à la santé.
- Le critère local / global renvoie à un « + » pour les ressources épuisables, l'accès aux services énergétiques et le changement climatique et à un « - » pour les autres problématiques.

4.3.5 Résultats de la discussion avec le Comité d'accompagnement

Pour procéder de manière fine à la comparaison des scores donnés par les deux membres du Comité d'accompagnement entre-eux et avec les cotes données par nous-mêmes, le tableau 11 (page suivante) a été constitué sur base de la métrique suivante : « 0 » vaut 0, « - » vaut 1, « + » vaut 2 et l'indication « -/+ » parfois utilisée vaut 1,5. CA1 et CA2 se réfèrent aux deux membres du comité d'accompagnement qui ont joué le jeu de remplir cette matrice de leur propre point de vue.

Tableau 11. Caractérisation des problématiques énergétiques en termes de critère du développement durable : comparaison de différentes approches

	Interdisciplinarité			Intergénérationnel			Incertitude			Participation			Local/global		
	CA1	CA2	IDD	CA1	CA2	IDD	CA1	CA2	IDD	CA1	CA2	IDD	CA1	CA2	IDD
Ress. Épuisables	1	1	1	2	2	2	2	1,5	1	1	0	0	2	2	1
Nucléaire	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	1	2	1
Ress. Renouv.	2	2	1	2	2	2	1	2	0	2	1	2	1	2	1
Accès	1	1	1	1	2	0	1	1	1	2	0	1	2	1	2
Chang clim	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	1	2	2	2
URE	1	1	2	0	2	1	1	1	0	2	1	2	2	1	1
Santé	1	1	2	2	2	0	2	1	1	1	1	0	1	0	2

La confrontation des matrices proposées par les membres du Comité d'accompagnement avec la matrice précédente révèle les résultats suivants²⁹. Pour 34% des cellules de la matrice (12 cellules sur 35), il y a unanimité sur la cote (ces cases sont identifiées en grisé dans le tableau). Seules 6 cotes (soit 17% des cellules) reflètent une *divergence complète* entre les opinions, c'est-à-dire le fait que les trois cotes possibles apparaissent (dans le tableau ci-dessus, ces cases sont sombres). Finalement, la moitié des cellules offre donc la possibilité d'un consensus dans le sens où une majorité se forme *a priori* en faveur d'une ou l'autre cote.

Ces résultats montrent que, contrairement à l'impression initiale, le caractère subjectif des cotes n'est pas aussi important que ça et que la réflexion et l'échange sur les opinions ou l'interprétation des critères sont susceptibles de faire converger les cotes selon des critères d'unanimité ou de majorité.

Les cotes de consensus sont plutôt groupées sur les trois premiers critères et sur des problématiques telles que le nucléaire et le changement climatique. Les cotes divergentes sont quant à elles plutôt centrées sur les problématiques dont l'acceptation est moins évidente : l'accès aux services énergétiques, notamment. Seules les problématiques des ressources épuisables et du nucléaire n'ont aucune cote divergente. Il est intéressant, en outre, de mettre en avant le fait que, sur les 12 cas de consensus, 9 correspondent à la cote maximale : cela révèle que les « juges » se rejoignent sur certaines notions fortes du développement durable et sur leur interprétation dans le contexte de la thématique énergétique³⁰.

Il est également possible d'exploiter cette matrice pour analyser les convergences de vue sur l'interprétation des relations entre problématiques et critères. On constate en l'occurrence que les conceptions sous-jacentes sur l'interdisciplinarité sont relativement cohérentes (4 consensus et pas de divergence) tandis que le critère intergénérationnel offre davantage de contraste avec quatre consensus, lui aussi, mais deux divergences. La configuration est à peu près similaire

²⁹ Deux membres du Comité d'accompagnement se sont prêtés à l'exercice.

³⁰ Nous rappelons que, pour cette thématique énergétique, aucune concertation préalable n'a été opérée entre les personnes ayant rempli cette matrice : nous analysons ici les résultats « bruts » qui nous ont été fournis. Pour la thématique d'aménagement du territoire, une discussion a été organisée lors de la réunion du Comité d'accompagnement du 31 janvier 2003 et des modifications parfois importantes d'interprétation et de cotations avaient été enregistrées.

pour le critère d'incertitude. Par contre, le critère participatif ne recueille aucun consensus et deux divergences tandis que le local/global est très mitigé avec un consensus, une divergence et cinq cotations qui demeurent ouvertes.

Il est possible de sommer ces scores en lignes et en colonne (voir le tableau 12 ci-dessous). En regardant les cotes en ligne, on obtient un classement des problématiques que l'on peut interpréter de la manière suivante : (i) plus le score est élevé pour une problématique donnée, plus celle-ci concentre de propriétés du développement durable, (ii) plus le score est élevé pour un critère donné, plus sa contribution est cruciale pour le développement durable. Le tableau suivant fournit le résultat de cette agrégation. L'intérêt de cette analyse par score réside surtout dans les scores globaux exhibés par colonne et par ligne.

Tableau 12. Somme des scores attribués aux problématiques et aux critères

	Interdisciplinarité	Intergénérationnalité	Incertitude	Participation	Local/global	TOTAL
Ressources épuisables	3	6	4,5	1	5	19,5
Nucléaire	6	6	6	4	4	26
Ressources renouvelables	5	6	3	5	4	23
Accès aux services énergétiques	3	3	3	3	4	16
Changement climatique	6	6	6	3	6	27
Utilisation rationnelle	4	3	2	5	4	18
Santé	4	4	4	2	3	17
TOTAL	31	34	28,5	23	30	146,5

Par colonne, on constate une hiérarchie claire :

- Le critère d'intergénérationnalité apparaît comme le celui qui contribue le plus à la question du développement durable pour cette thématique énergétique (score de 34, à 3 points du second) ;
- Les critères d'interdisciplinarité, d'incertitude et de local/global se situent dans un « mouchoir de poche » avec des contributions globalement très similaires (score moyen de 30 avec des écarts de +1 et -1,5 points autour de cette moyenne) ;

-
- Le critère participatif est nettement en retrait par rapport aux précédents avec un score de 23, à 4,5 points du critère précédent le plus faible.

L'analyse en ligne révèle les éléments suivants :

- Le changement climatique (27 points) constitue la problématique qui rassemble le plus de caractéristiques du développement durable, mais à peine plus que la problématique... du nucléaire (26 points) ;
- Les problématiques des ressources sont ensuite relativement proches l'une de l'autre, avec un poids plus important concédé à la problématique des ressources renouvelables (23 points contre 19,5 pour les ressources épuisables) ;
- Enfin, les trois autres problématiques (accès aux services énergétiques, URE et santé) constituent un ensemble relativement homogène avec respectivement 16, 17 et 18 points.

4.4 La thématique de l'aménagement du territoire

L'aménagement du territoire a pour objet l'utilisation optimale de ce qui constitue le support de toute activité humaine et de toute vie animale et végétale - à l'exception de celle qui a l'océan pour cadre - ainsi que de la plupart des ressources naturelles accessibles pour l'homme : l'espace. Elle est donc naturellement au cœur de la problématique du développement durable et en constitue un des instruments les plus puissants. Pour cette raison, l'aménagement du territoire ne constitue pas une thématique de même nature que l'énergie, l'eau, la mobilité, la biodiversité, etc. qui ne concernent qu'un secteur ou un domaine particulier – jugé problématique – du développement. Traitant du support même de toutes ces thématiques partielles, elle les englobe nécessairement. On ne s'étonnera donc pas si l'examen des problématiques qui composent la thématique générale de l'aménagement du territoire nous amène à considérer comme telles des thématiques entières comme l'énergie –d'ailleurs traitée à ce titre dans notre étude -, l'eau, la mobilité, la pauvreté, etc.

Il nous a semblé que, parmi les nombreux domaines concernés par l'aménagement du territoire, l'énergie, l'eau, la biodiversité, la mobilité, la santé, la pauvreté et les aménités, constituaient les enjeux les plus importants en termes de développement durable.

4.4.1 Une description des problématiques

4.4.1.1 L'énergie

Les pratiques et les règlements en matière d'urbanisme ont des répercussions évidentes sur les consommations énergétiques, principalement du secteur résidentiel. On sait qu'une maison « quatre-façades » connaît des déperditions de chaleur supérieures à un appartement ou une maison deux façades. Le secteur résidentiel est d'ailleurs le secteur qui avec les transports, a connu la plus forte croissance en matière de consommation énergétique au cours des 25 dernières années. Par ailleurs, c'est également par le biais des règlements d'urbanisme et l'octroi des permis de bâtir que les pouvoirs publics peuvent imposer des normes d'efficacité énergétique aux nouvelles constructions ou aux transformations des constructions existantes. De même, le potentiel que constitue la cogénération est fortement dépendant de la structure et de la densité du tissu urbain.

L'exemple du parc éco-industriel de Kalundborg, au Danemark, montre aussi tout le parti que l'on peut tirer d'une politique d'aménagement du territoire pour une utilisation rationnelle de l'énergie.

4.4.1.2 L'eau

Les cycles et systèmes hydriques sont profondément affectés par les établissements humains. Par exemple, l'extension des surfaces couvertes de revêtements imperméables fait obstacle à la percolation des eaux de pluie vers les nappes phréatiques et entrave leur alimentation tout en provoquant des ruissellements qui se déversent directement ou indirectement dans les cours d'eau, provoquant des risques d'inondation. La disparition, suite à l'aménagement du sol pour les besoins de l'agriculture industrielle, des haies, des talus, des zones humides, etc. contribue aussi à ce problème.

Le phénomène de la péri-urbanisation pose, quant à lui, le problème de la collecte des eaux usées. L'extension tentaculaire des zones urbanisées exigerait le développement concomitant d'infrastructures de collecte des eaux usées ; ce qui n'est pas toujours le cas, pour les collectivités locales, de disposer des moyens nécessaires. Il en résulte une augmentation du nombre de logements non reliés à système d'égouttage ce qui, en l'absence de réglementations strictes en matière d'épuration individuelle ou de l'absence de contrôles sur le respect de celles-ci, se traduit par des rejets d'eaux usées directement dans l'environnement.

4.4.1.3 La biodiversité

L'extension du bâti s'effectue toujours peu ou prou au détriment d'habitats d'espèces animales et végétales et donc au détriment de la biodiversité. Même lorsque ces habitats ne sont pas totalement détruits, l'aménagement de routes, de zonings, d'infrastructures portuaires ou aéroportuaires et les constructions peuvent morceler (phénomène dit du « mitage »), les écosystèmes et les rendre incapables de remplir leurs fonctions nécessaires à la préservation de la biodiversité. Indépendamment de l'occupation et du morcellement même des territoires, les pollutions et nuisances (bruit, perturbation de la circulation de la lumière, engendrées par les activités humaines en certains lieux (aéroports, par exemple) perturbe la vie animale et les cycles végétaux.

4.4.1.4 La mobilité et les transports

Le phénomène de péri-urbanisation et les politiques volontaristes en matière de créations de parcs et de zonings industriels influencent considérablement la demande en infrastructures de transport et la mobilité (avec les effets en retour considérables de ceux-ci sur les aménagements futurs), avec toutes les conséquences connues en termes de consommation d'énergie, de pollutions locales et globales (changement climatique), de nuisances et de risques d'accidents.

Le phénomène le plus crucial à cet égard est la tendance à la spécialisation à outrance de l'espace et le caractère mono-fonctionnel des aménagements. Les espaces consacrés à l'activité industrielle, au commerce, au logement et au loisir sont nettement séparés les uns des autres, induisant la nécessité de recourir à des moyens de transport consommateurs d'énergie et sources de pollution pour se rendre de l'une à l'autre. Du même coup, les habitants mal desservis par les transports en commun et qui, pour des raisons pécuniaires ou de santé, n'ont pas à leur disposition de véhicule personnel se trouvent isolés, marginalisés et n'accèdent que difficilement aux services dont ils auraient besoin, y compris les services médicaux et sociaux.

4.4.1.5 Santé, sécurité et bien-être

Les choix d'aménagement du territoire, et notamment l'hyperspécialisation fonctionnelle de l'espace ne sont pas sans conséquences importantes pour le bien-être, l'intégration sociale, le sentiment de sécurité et la santé des habitants. La priorité donnée au transport routier y compris au cœur des villes et des villages, l'aménagement d'aéroports à proximité de (si pas au milieu) de zones résidentielles accompagné de l'autorisation des vols de nuit exposent les riverains à des nuisances et des pollutions dont leur bien-être, quand ce n'est leur santé, est affecté. Ce n'est pas un hasard si l'OMS³¹ a pris une initiative pour sensibiliser les acteurs de l'aménagement aux relations entre planification urbaine et santé publique. La santé mentale est une composante importante de celle-ci et dépend en partie de l'exposition au stress (bruit, agitation, insécurité), de la surpopulation, ou, au contraire, de l'isolement et du manque de relations sociales.

Le fait que certains quartiers, en majorité occupés par des bureaux ou des commerces, se trouvent presque complètement déserts en dehors des heures d'activité professionnelle, est une des causes du sentiment d'insécurité pour les habitants qui y résident et favorise de toute façon le développement ou la concentration d'activités illégales ou, selon l'expression superbement fonctionnaliste du sociologue, « à faible légitimité sociale ».

4.4.1.6 La pauvreté

Par ses liens avec la question du logement et des prix des loyers, la politique d'aménagement touche à une composante fondamentale de la pauvreté et de l'exclusion. Tout d'abord, les frais de logement représentent une part considérable du budget des familles modestes, ce qui les empêche souvent d'accéder à un niveau jugé satisfaisant de consommation dans les autres domaines: soins de santé, loisirs, culture. Il appartient donc, en partie, à une politique d'aménagement du territoire de faire en sorte que toutes les catégories de revenu puissent trouver à se loger à des prix abordables et dans des conditions de confort, de salubrité et d'accessibilité aux services collectifs conformes au niveau de vie général de nos sociétés.

Par ailleurs, le fait même de ne pas disposer d'un logement décent - quand ce n'est pas d'un logement tout court - est une source supplémentaire de marginalisation et de maladie qui enferme ceux qui en sont victimes dans le cercle vicieux de la pauvreté.

4.4.1.7 Les aménités

La disparition ou la marginalisation du patrimoine naturel et architectural à cause de l'extension du bâti constitue également un problème de développement durable puisque c'est une part du patrimoine ancestral qui ne sera plus accessible aux générations futures. Il y a, en effet, dans ces aménités paysagères une valeur dite de legs qu'il importe de préserver.

³¹ WHO (1999), Health and Urban Planning : a guide to principles, planning and spatial policy. Copenhagen.

4.4.2 Problématiques et critères d'une approche en termes de développement durable

La prise en compte de ces problématiques sous l'angle du développement durable peut s'exprimer dans la matrice suivante.

Tableau 13. La matrice C.P pour la thématique de l'aménagement du territoire

	Interdisciplinarité	Intergénérationnalité	Incertitude	Participation	Local/global
Energie	-	-	0	+	-
Biodiversité	+	0	-	-	+
Eau	+	0	-	+	+
Mobilité	0	+	+	+	+
Pauvreté, exclusion	+	+	-	+	-
Santé, bien-être, sécurité	+	-	-	+	+
Aménités	+	+	0	+	0

Pour comprendre les raisons qui ont présidé à l'affectation d'une valeur à chacune des cellules de la matrice, il importe de préciser l'interprétation que nous avons faite de certains des 5 critères généraux dans le contexte de l'aménagement du territoire.

L'aménagement du territoire est au minimum nécessairement multidisciplinaire. Chaque plan de secteur, chaque décision d'affectation du sol met en jeu des considérations économiques, juridiques, institutionnelles, sociologiques, démographiques, etc., que le technicien de l'aménagement du territoire a nécessairement à l'esprit. On aurait donc pu mettre un + dans toutes les cases de la colonne 1. Néanmoins, il nous a paru plus éclairant de mettre seulement en évidence les problématiques qui exigeaient une collaboration plus étroite entre les spécialistes de l'aménagement du territoire et le ou les spécialistes de la dite problématique afin de prendre des décisions conformes à un développement durable. C'est pourquoi la mobilité s'est vue attribuer la valeur 0 : étant au cœur même du métier d'urbaniste et de géographe spécialisé en urbanisme et aménagement du territoire, sa prise en compte dans le cadre du développement durable n'exige pas, à notre avis, de coopération plus poussée, plus intime que dans le cadre du BAU (*business as usual*).

Le premier critère retenu est donc celui-ci : la recherche de durabilité crée-t-elle une exigence d'interdisciplinarité supplémentaire avec telle ou telle discipline ou celle-ci est-elle déjà assurée dans le cadre des pratiques actuelles qui ne se préoccupent pas de durabilité ?

Une façon d'opérationnaliser ce critère est de considérer qu'une problématique requiert une approche interdisciplinaire si et seulement si son objet même ne peut être effectivement et efficacement contrôlé (au sens cybernétique du terme, c'est-à-dire commandé de l'extérieur) qu'à partir d'un modèle interdisciplinaire ou transdisciplinaire, ce qui, comme nous l'avons

montré dans le chapitre 1 (voir également Boulanger et Bréchet (2002, p. 7), suppose une interaction forte entre les domaines concernés (relation de A vers B et feedback de B sur A). Cette interaction forte nécessite alors un véritable *dialogue interdisciplinaire* seul susceptible de faire ressortir ses effets émergents. On attribuera donc une cote +1 en matière d'interdisciplinarité lorsqu'il importe de considérer non seulement les impacts de l'AT sur une problématique qui relève d'une ou plusieurs autres disciplines mais également quand l'aménagement du territoire impose de prendre en compte les effets en retour de ces problématiques sur la ville ou le territoire et son occupation, effets qui peuvent éventuellement contrecarrer les intentions du planificateur et tels qu'un véritable dialogue entre lui et le ou les spécialistes de la discipline doit s'instaurer.

Le critère «long terme/intergénérationnel » peut être interprété de la même façon que celui de l'interdisciplinarité. Par exemple, il est clair que la problématique de l'énergie dans le cadre du développement durable est une problématique de long terme. Cependant, telle qu'interprétée et mise en œuvre dans le contexte de l'aménagement du territoire, le respect des exigences du DD en termes d'énergie ne nécessite pas une exploration spécifique du long terme. Il suffit, par exemple, de respecter les normes d'efficacité thermique des matériaux et des bâtiments, de faire appliquer certaines mesures, etc., sachant que ces normes et ces mesures sont elles-même le produit d'une réflexion et d'études prenant le long terme en considération, impliquant la participation des professionnels de la construction, des consommateurs, etc. L'urbaniste bénéficie ici du travail effectué par les responsables de la thématique « énergie » sans qu'il lui soit nécessaire d'entretenir un dialogue avec eux. Evidemment, il est des cas particuliers, très spécifiques, où ce n'est plus le cas. Par exemple, lorsqu'il s'agit de prévoir et d'aménager un site pour la construction d'une centrale nucléaire. Dans une telle occurrence, toutes les incertitudes, les risques, les conséquences à long terme de cette filière énergétique se trouvent importées dans la décision d'aménagement du territoire qui est en fait, autant une décision d'investissement énergétique que d'AT proprement dit.

Le critère de la « participation » mérite également certains éclaircissements. Nous avons considéré comme particulièrement important ici le fait de savoir si la prise en compte d'un savoir local était indispensable à une prise de décision conforme aux exigences du DD. Car, il y a, au fond, trois raisons majeures de faire participer les parties prenantes à une décision. La première découle des idéaux démocratiques de notre civilisation qui exige que chacun puisse prendre part aux décisions qui le concernent. La seconde est d'ordre stratégique : il s'agit de faire en sorte que les parties prenantes adhèrent à la décision, la soutiennent et contribuent à ce qu'elle soit mise en œuvre. La troisième raison est de pouvoir accéder à un savoir indispensable à la réussite du projet et introuvable ailleurs que chez les parties prenantes elles-mêmes, un savoir qu'on pourra qualifier de local. La différence, ainsi que la complémentarité, entre savoir global et savoir local sont particulièrement clairs dans la pratique courante en navigation maritime de faire effectuer les manœuvres d'entrée et de sortie des ports, non pas par le capitaine du navire, mais par un pilote chargé par les autorités portuaires de prendre, le temps des manœuvres en question, le commandement de ce navire. C'est qu'en effet, les compétences générales du commandement sont souvent insuffisantes pour accomplir en toute sécurité les manœuvres portuaires. Seul, le savoir local du pilote concernant les courants, les hauts fonds, les bancs de sable, le micro-climat, etc. garantit la sécurité maximale pour tous les usagers des installations portuaires.

Ces éclaircissements étaient indispensables pour comprendre la façon dont nous avons rempli la matrice problématiques/critères.

4.4.3 Analyse de la matrice par ligne

4.4.3.1 L'énergie

En ce qui concerne l'énergie, et pour les raisons évoquées plus haut, il nous a semblé qu'une interdisciplinarité supplémentaire minimale était suffisante. En effet, si on la considère indépendamment de celle de la mobilité, elle se résume principalement à la problématique de l'efficacité énergétique d'une part, et de la substitution d'énergie provenant de sources non renouvelables à de l'énergie provenant de sources renouvelables, d'autre part. De ce point de vue, le dialogue interdisciplinaire n'est pas fondamental et les incertitudes sont faibles. En effet, il existe d'ores et déjà des normes d'isolation des bâtiments ; les technologies de la construction permettant d'économiser l'énergie sont bien connues ; la maîtrise des énergies renouvelables est maintenant suffisante pour les mettre en application, etc.

Comme nous l'avons montré dans la discussion générale du critère de prise en compte de l'intergénérationnel, l'importance de la prise en compte des effets énergétiques à long terme n'est pas indispensable même dans une optique de développement durable, sauf sans les cas bien spécifiques d'installation de centrales électriques quelles qu'elles soient et davantage encore si' il s'agit de centrales nucléaires ou hydroélectriques.

Ce n'est pas non plus une problématique qui met en jeu des interactions complexes entre le local et le global. En revanche, elle peut difficilement se passer de la participation des parties prenantes dans la mesure où elle exige de leur part l'acceptation de surcoûts d'investissement initial dans les bâtiment (isolation supplémentaire, chauffe-eau solaires plus coûteux à l'achat, etc.) de la création de parcs d'éoliennes, par exemple. Elle demande aussi un effort de formation aux professionnels du secteur, etc.

4.4.3.2 La biodiversité

La prise en compte des impacts de l'aménagement du territoire sur la biodiversité exige, à notre avis, un niveau plus élevé d'interdisciplinarité. En effet, la chaîne causale qui va de la décision en matière d'occupation des sols à l'impact en termes de biodiversité peut dans parfois s'avérer très complexe et comporter des effets d'ordre très différents : hydrologiques, géologiques, chimiques, botaniques, etc. Ces effets, s'ils ne sont pas immédiats, se manifestent en général relativement vite. Dès lors, même si c'est principalement en fonction des intérêts des générations futures que l'on se préoccupe de biodiversité, il n'est guère nécessaire d'adopter une perspective de long terme dans l'examen des impacts en la matière. En revanche, vu la complexité de la chaîne causale qui relie les activités humaines à la biodiversité, il y règne encore de nombreuses incertitudes.

Une autre caractéristique de cette chaîne causale est le fait que les effets sur la biodiversité des choix d'aménagement du territoire peuvent se manifester d'une part à une distance parfois considérable du lieu faisant l'objet de l'aménagement et, d'autre part, dans un rayon parfois important autour de ce point. Il est donc impossible de se contenter de prendre en compte les effets localisés de la décision si l'on veut atteindre l'impact réel en termes de biodiversité de l'aménagement envisagé. Quant à la participation des parties prenantes, elle se limite généralement, en la matière, à celle des naturalistes qui, d'une part possèdent le savoir nécessaire à propos de la biodiversité locale et, d'autre part, sont les plus concernés par la protection de tel ou tel habitat, telle ou telle population.

4.4.3.3 *L'eau*

Ce qui vient d'être dit pour la biodiversité s'applique également quasiment tel quel pour la problématique de l'eau. Les deux problématiques sont d'ailleurs souvent étroitement liées : bon nombre d'impacts sur la biodiversité sont imputables à des perturbations des systèmes hydriques (eutrophisation, par exemple). La prise en compte de ces impacts demande une approche interdisciplinaire forte dans la mesure où les modifications induites par l'aménagement du territoire dans le fonctionnement des systèmes hydriques rejouent à leur tour sur la viabilité des aménagements : que l'on songe par exemple aux inondations, aux effets de l'humidité sur les matériaux, etc.

Nous n'avons pas estimé devoir prendre spécialement en considération des effets de long terme en la matière mais n'étant pas spécialistes de ces questions, il se peut que nous sous-estimions l'importance de ce critère dans le domaine de l'eau. En revanche, la dialectique du global et du local prend manifestement ici toute son importance. Les impacts sur le fonctionnement des systèmes hydriques résultent souvent d'effets de composition et d'agrégation de micro-décisions locales et l'on sait que la problématique de l'eau exige une politique intégrée définie au niveau du bassin versant considéré dans sa globalité.

La composante « incertitude » est ici présente sous la forme d'une part de l'aléatoire, d'autre part du risque. L'aléatoire parce que les phénomènes météorologiques qui interagissent avec les pressions anthropiques pour déterminer le comportement des systèmes hydriques comportent une part irréductible de hasard dont il faut tenir compte. Le risque, parce que les conséquences de l'imprévoyance en la matière peuvent être considérables, non seulement d'un point de vue matériel mais même en termes de vies humaines. Enfin, le milieu aquatique étant la base d'un grand nombre d'activités humaines et une ressource d'une telle importance pour l'équilibre écologique et même pour la satisfaction des besoins essentiels de l'homme, il est impensable de le gérer sans une intense participation de toutes les parties prenantes.

4.4.3.4 *La mobilité*

La prise en compte de mobilité fait maintenant partie du « core business » de l'aménagement du territoire et même si les plans de mobilité font l'objet de programmes spécifiques à côté des plans d'aménagement, le lien entre les deux est évidemment très étroit. Pour ce qui concerne les grandes villes, on peut même penser que l'aménagement du territoire est devenu un instrument de gestion de la mobilité. D'ailleurs, la plupart des outils de modélisation utilisés aujourd'hui s'appellent *Land Use and Transportation Model* indiquant par là que les deux problématiques sont considérées conjointement, ce qui n'était pas toujours le cas, il y a seulement 10 ans d'ici.

L'importance accordée au critère « long-terme/intergénérationnel » s'explique par le caractère parfois séculaire de l'impact des aménagements en matière de mobilité. Que l'on songe au tracé, encore visible aujourd'hui dans le paysage, des voies romaines (qui empruntaient d'ailleurs probablement des voies plus anciennes encore) ; au rôle du développement du chemin de fer et des vicinaux au XIX^e siècle sur la structure de l'espace en Belgique ; au rôle des voies navigables pour l'installation d'industries, etc. Même sans aller aussi loin, l'importance des sommes nécessaires pour l'aménagement des voies de communication et la difficulté de les rentabiliser rapidement font que les décisions en la matière doivent être envisagées à un horizon temporel de moyen terme, au minimum.

L'importance accordée à la composante « incertitude-risque » se justifie évidemment par le fait que les décisions en la matière ont des répercussions à très long terme - et ont donc une composante d'irréversibilité - mais aussi et surtout parce que gérer la mobilité, c'est privilégier tel mode de transport par rapport à tel autre et que ceux-ci ne sont pas équivalents en termes de risque.

L'essence même de la mobilité consiste à mettre en relation différents points d'un territoire. La composante « global-local » est donc inscrite au cœur de cette problématique comme c'est le cas pour tout ce qui offre un caractère réticulaire (qui est de la nature du réseau). On reviendra sur cette constatation dans nos conclusions.

Quant à la composante « participation » elle est fondamentale compte tenu de l'emprise des décisions en matière de mobilité sur les infrastructures avec tout ce que cela comporte d'expropriations et d'externalités (positives et négatives) qui ne peuvent s'envisager sans la participation des différentes parties prenantes.

4.4.3.5 La pauvreté, l'exclusion

L'aménagement du territoire, on l'a vu, peut mener à ce que des sous-régions entières se trouvent marginalisées, rendant problématique l'accès de ses habitants à l'emploi, à l'éducation, à la santé, à un environnement sain et agréable, etc. Etant donné le caractère fondamentalement multidimensionnel de la pauvreté et de l'exclusion, seule une approche intégralement interdisciplinaire permet de l'intégrer dans les décisions d'aménagement du territoire.

Sous l'angle de la pauvreté, même si les effets des décisions (et des non décisions) en matière d'aménagement du territoire peuvent se faire sentir assez rapidement, il en est d'autres qui ne se manifestent qu'à moyen ou même très long terme comme le montre l'exemple des « distressed areas » en Grande-Bretagne ou du Borinage chez nous qui font encore aujourd'hui les frais de l'absence de vision prospective dans les décisions les concernant, et cela, après avoir été les « Silicon Valley » de la première époque de la révolution industrielle.

Le rapport entre aménagement du territoire et pauvreté est relativement incertain. Il serait faux de parler d'un déterminisme strict entre l'un et l'autre. En même temps, les mécanismes qui à court terme peuvent mener à la constitution de poches de pauvreté et d'exclusion sont relativement bien connus et laissent peu de place à l'incertitude. Par exemple, on connaît depuis quelques décennies déjà les effets en termes de création de poches de pauvreté et d'exclusion d'une politique de construction et de localisation de HLM dans les banlieues des grandes agglomérations. En même temps, certains effets se faisant sentir à plus longue échéance, laissent ainsi la possibilité à de nombreux facteurs plus ou moins aléatoires de se manifester. L'incertitude reste donc profonde dans ce domaine.

En ce qui concerne la participation, elle nous paraît indispensable pour éviter que des décisions d'aménagement du territoire se retournent contre ceux-là même qu'elles prétendent parfois aider. Ainsi, la rénovation de quartiers dits « déshérités » est-elle souvent loin de profiter à ceux qui les habitent si elle conduit à les en chasser pour laisser la place à des populations plus aisées et qui ont les moyens de payer les loyers plus chers qu'une rénovation peut justifier. Même en cas de relogement dans des habitations plus récentes et plus « confortables », ces opérations de rénovation mettent souvent fin à des relations communautaires, de solidarité et d'entraide qui peuvent présenter une importance équivalente aux yeux des intéressés à celle d'un confort matériel, le plus souvent très relatif d'ailleurs, et correspondre ainsi à un appauvrissement supplémentaire.

Par contre, il ne nous a pas semblé que la capacité de prendre en compte les interactions entre niveaux institutionnels ou sociopolitiques différents jouait un rôle fondamental dans la prise en compte de la problématique de la pauvreté au sein d'une politique d'aménagement du territoire.

4.4.3.6 *La santé, la sécurité et qualité de la vie*

La santé et la qualité de la vie sont étroitement interdépendantes et sont conditionnées par l'interaction de multiples facteurs physico-chimiques, biologiques, économiques, sociologiques et psychologiques. La notion de cadre de vie, qui désigne une résultante de la politique d'aménagement du territoire synthétise un certain nombre de ces facteurs. Il est indéniable qu'une approche satisfaisante de cette notion requiert une approche profondément interdisciplinaire.

C'est, en revanche, une problématique où les enjeux sont bien davantage la satisfaction des besoins des générations présentes que celle des générations à venir. Les conséquences à long terme existent cependant. Ainsi, les implantations de sites d'enfouissement de déchets peuvent-elles ne faire sentir leurs effets sur la santé qu'au terme d'un processus parfois assez long d'accumulation de substances toxiques. Néanmoins, dans la plupart des cas, les nuisances susceptibles de mettre en danger la qualité de vie, la sécurité ou même la santé des populations se manifestent rapidement et exercent des effets relativement immédiats. Qu'on songe par exemple au bruit occasionné par l'implantation d'infrastructures aéroportuaires.

Incertitudes et risques ne sont pas un élément majeur de la problématique. Ils existent néanmoins et on garde en mémoire les inondations catastrophiques dues à des aménagements perturbant l'écoulement normal des torrents ou l'absorption graduelle de l'eau de pluie.

La participation des parties prenantes est sans doute une condition *sine qua non* pour que les décisions d'aménagement du territoire ne se retournent pas contre les populations qui en constituent les cibles ou en subissent les effets. Des projets qui ont réellement en vue la qualité de la vie et le bien-être de résidents ou de riverains ne peuvent se concevoir et se réaliser sans la participation de ceux-là même qui sont supposés en bénéficier. Les trois raisons pour lesquelles, selon nous, la participation constitue un élément d'une politique de développement durable se trouvent en effet réunies pour qu'il en soit ainsi.

La dimension « local-global » est manifeste en matière de santé. Du fait du transport par l'eau et l'air de substances polluantes à des distances parfois considérables de leur lieu d'émission, ou d'effets de rayonnement, des implantations industrielles ou des sites d'enfouissement ou de traitement des déchets, par exemple - l'exemple des incinérateurs est bien connu en Belgique - peuvent affecter la santé de populations de zones bien plus vastes que la localité qui abrite le projet lui-même.

4.4.3.7 *Les aménités paysagères*

Souvent, la mise en évidence d'aménités paysagères résulte de l'intervention de spécialistes de disciplines qui ne sont pas systématiquement consultées au moment de prendre une décision d'affectation du sol à tel ou tel usage. Ainsi, il a parfois fallu une mobilisation d'archéologues, d'historiens, ou même d'artistes pour sauver des sites riches de vestiges historiques ou artistiques de grande valeur alors que celle-ci avait échappé aux urbanistes et parfois aussi aux populations locales.

La préservation de cette valeur prend tout son sens du fait qu'elle nous a été transmise par les générations passées et qu'il nous paraît injuste d'en priver les générations futures pour la satisfaction de demandes actuelles d'une importance toute relative. Le respect des aménités résulte donc avant tout de la prise en compte des intérêts des générations futures.

En ces matières l'incertitude est faible (mais jamais tout à fait absente) : le projet d'aménagement préserve ou non l'aménité paysagère. Il est en général possible d'en décider

avec une faible marge d'incertitude. L'incertitude porte plutôt sur la valeur intrinsèque du site et la perception qu'en auront les générations futures.

De plus, les effets sont le plus souvent immédiats : il ne faut pas attendre très longtemps pour voir disparaître un site archéologique, un paysage, une demeure historique sous les coups des bulldozers...

La participation des populations n'est pas un garant suffisant de la préservation du patrimoine paysager ou monumental. En revanche, c'est souvent grâce à l'intervention d'associations de la société civile que les aménités ont pu être préservées. Le local n'est pas toujours seul en cause, ici. Certaines aménités font, en effet, partie du « patrimoine mondial » de l'humanité.

Voici donc les raisons qui ont motivé nos propres choix pour la caractérisation des problématiques liées à l'aménagement du territoire et leur prise en compte en termes de développement durable. Il est cependant intéressant de confronter notre propre vision à celle de deux membres de notre comité d'accompagnement qui ont accepté de se prêter à l'exercice. Le tableau ci-dessous permet cette comparaison.

Tableau 14. Caractérisation des problématiques de l'aménagement du territoire en termes de critères du développement durable : comparaison de différentes approches

	Interdisciplinarité			Intergénérationnel			Incertitudes			Participation			Local-gobal		
	CA1	CA2	IDD	CA1	CA2	IDD	CA1	CA2	IDD	CA1	CA2	IDD	CA1	CA2	IDD
Energie	1,5	2	1	2	2	1	1	2	0	1	2	2	2	2	0
Biodiversité	1	1	2	2	2	0	2	2	2	1	2	1	1,5	2	2
Eau	2	2	2	2	2	2	1	2	1	1	2	2	2	1	2
Mobilité	1,5	2	0	2	1	2	1	0	2	2	2	2	1	0	2
Pauvreté, exclusion	1	1	2	1	2	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1
Santé, bien-être, sécurité	1,5	1	2	2	1	1	2	1	1	2	1	2	0	2	2
Aménités	1	1	2	2	2	2	1	0	0	2	2	2	1,5	0	1

CA1 et CA2 se réfèrent aux deux membres du comité d'accompagnement. Nous avons procédé à la recodification suivante : 0 = 0, - = 1, + = 2 afin de pouvoir attribuer une valeur de 1,5 aux cotes « -/+ » utilisées à plusieurs reprises par un des « juges » et permettre le calcul de sommes et des moyennes.

Nous n'allons pas discuter ce tableau case par case mais seulement mettre en évidence celles qui font l'objet d'un consensus (trois cotes identiques) et celles qui au contraire ont donné lieu aux variations les plus importantes (trois cotes différentes).

Du côté du consensus, on peut relever les cases suivantes : (biodiversité-incertitudes), (eau, interdisciplinarité), (eau, intergénérationnel), (mobilité, participation), (aménités, intergénérationnel), (aménités, participation), (pauvreté, incertitudes). L'eau et les aménités sont considérées unanimement comme des problématiques hautement intergénérationnelles. L'eau est également considérée par tous comme particulièrement interdisciplinaire. La participation est jugée particulièrement importante dans le cas de la mobilité et des aménités. Les incertitudes dans le domaine de la biodiversité sont signalées par les trois juges ainsi que dans

le domaine de la pauvreté. Seulement, elles sont considérées comme très importantes dans le premier cas et comme moins importantes dans le deuxième.

Du côté des plus grandes variations, on note les cases suivantes : (énergie, incertitudes), (mobilité, incertitudes), (mobilité, local-global). On constate que 2 cas sur trois impliquent l'incertitude. Peut-être certains juges incluent-ils les risques pour la population dans le critère d'incertitude, et d'autres non. Le statut de la dimension « local-global » semble également faire problème dans le domaine de la mobilité.

Il est également intéressant de mettre en évidence des polarisations (2 contre 1). C'est le cas pour les cases suivantes : (énergie, local-global), (biodiversité, intergénérationnel), (santé, local-global). La dimension « local-global » est celle qui suscite les polarisations les plus nombreuses. Faut-il en conclure à des compréhensions très différentes du critère ?

Si l'on somme en ligne les cotes attribuées par chaque juge on obtient un classement des problématiques que l'on peut interpréter de la manière suivante : plus le score est élevé, plus la problématique concentre de propriétés du développement durable. Ainsi, la problématique qui semble présenter la plus grande adéquation par rapport à ce que recouvre le concept de développement durable est celle de l'eau, suivie de la biodiversité puis de la pauvreté puis, *ex æquo* de l'énergie et de la santé-sécurité. Viennent en dernier la mobilité et les aménités.

Les sommes en colonne permettent un classement parallèle des critères. Les deux premiers *ex æquo* sont l'intergénérationnel et la participation, puis l'interdisciplinaire, puis le local-global et enfin, l'incertitude.

Tableau 15. Somme des scores attribués aux problématiques et aux critères

	Interdisciplinarité	Intergénérationnalité	Incertainité	Participation	Local/global	Total
Energie	4,5	5	3	5	4	21,5
Biodiversité	4	4	6	4	5,5	23,5
Eau	6	6	4	5	5	26
Mobilité	3,5	5	3	6	3	20,5
Pauvreté, exclusion	4	4	3	5	4	20
Santé, bien-être, sécurité	4,5	4	4	5	4	21,5
Aménités	4	6	2	6	2,5	20,5
TOTAL	30,5	34	25	36	28	

La première place occupée par la participation constitue une surprise même si après coup, cela paraît parfaitement logique. Peu de domaines d'intervention ont autant d'impacts sur la vie quotidienne que l'aménagement du territoire. Il est donc normal que les populations y soient associées dans toute la mesure du possible. Ce n'est d'ailleurs pas un hasard si le législateur a prévu depuis quelques décennies déjà, différentes étapes et formes de consultation de la population dans le cadre des plans d'aménagement du territoire, telles que les commissions consultatives d'aménagement du territoire aux niveaux régional et communal (et même provincial en région flamande) et les enquêtes publiques dites *commodo* et *incommodo*. Il est à noter que l'accord entre les « juges » sur l'importance de ce critère est assez remarquable.

La deuxième place accordée à l'intergénérationnel est le résultat d'un compromis. Les deux membres du comité d'accompagnement l'ont placée en première place (*ex aequo* avec la participation pour l'un d'entre eux) alors que nous lui avons accordé une petite 4^{ème} place. À la réflexion, cette position se justifie par l'influence de l'AT sur des problématiques qui relèvent du long terme comme le changement climatique (*via* l'énergie), la biodiversité et l'eau.

L'interdisciplinarité se trouve en troisième position du fait même du nombre de problématiques différentes touchées par les politiques d'aménagement du territoire. Comme on l'a déjà noté, peu de domaines mettent en jeu de façon aussi étroite sciences physiques, sciences biologiques, sciences sociales et sciences humaines. En fait, c'est tout le spectre du savoir humain (et pas seulement du savoir scientifique puisque les disciplines artistiques ont ici leur place) qui est ici mobilisé. Seulement, on aurait pu s'attendre à la voir occuper une place plus importante. Sans doute faut-il considérer que la prise en compte du développement durable ne change pas fondamentalement la donne de ce point de vue.

Enfin, du fait de la structure topologique (réticulaire) de l'espace et de la structure hiérarchique des territoires, l'aménagement du territoire est le domaine par excellence où il importe de garder en permanence à l'esprit les conséquences pour les territoires englobants de décisions prises à l'échelle locale et vice-versa. Or, le critère « local-global » arrive en avant dernière position. Serait-ce que l'exigence de durabilité ne modifie pas fondamentalement cet état de choses et qu'il serait déjà pris en compte dans les pratiques actuelles ou que cette dimension est encore largement sous-estimée ?

La place de l'incertitude, en dernière position, est moins surprenante. Certes, si les critères sont cohérents entre eux – ce que nous pensons – l'accent mis sur l'intergénérationnel et le long terme devrait entraîner une prise de conscience des incertitudes inéluctablement croissantes avec l'horizon temporel. Toutefois, à la réflexion, ce classement est pourtant logique : les incertitudes ne se situent pas tant au niveau des relations entre l'aménagement du territoire et les problématiques qui engagent le long terme (l'énergie, la biodiversité, etc.) qu'au sein de ces problématiques elle-mêmes, ce dont nous n'avons pas à tenir compte ici.

Si on se penche maintenant sur les résultats en ligne, on constate que l'ordre de classement des problématiques en terme de développement durable semble refléter une certaine domination de l'environnemental. L'ordre, en effet, est le suivant : l'eau puis la biodiversité, ensuite la santé et l'énergie *ex aequo*. Viennent ensuite, *ex aequo* également, les aménités et la mobilité et enfin, en dernier lieu, la pauvreté. Il semble bien, en effet, que le rôle de l'aménagement du territoire dans la lutte contre la pauvreté soit sous-estimé. Plus étonnante est la place de la mobilité, en troisième position. On aurait pu s'attendre à ce qu'elle figure en tête des préoccupations liées à l'aménagement du territoire. Cependant, la mobilité n'est que marginalement un problème de développement durable en ce sens que ce sont essentiellement les générations actuelles qui sont confrontées, en ce moment, à des problèmes de mobilité.

Chapitre 5. Adéquation modèles / thématiques / critères : l'énergie

Ce chapitre assure la mise en cohérence entre les analyses modèles/critères et problématiques/critères ; il permet d'obtenir une classification dans l'espace modèles/problématiques par *mapping* matriciel, ainsi qu'expliqué dans le chapitre 2 de ce rapport. La classification qui résulte de cette opération matricielle peut ensuite être analysée et comparée à celle qui aurait été faite « à la main », sur jugements d'experts. La comparaison contraint l'expert à une analyse cohérente dans les trois dimensions que sont les critères, les problématiques et les modèles : tout résultat apparemment inattendu à cette étape de l'analyse est le résultat des cotations précédentes et oblige donc l'expert à les reconsidérer. Cette analyse permet *in fine* de révéler les points forts des approches actuelles et les points susceptibles d'être améliorés, conformément aux objectifs de cette recherche. L'objectif, rappelons-le une fois de plus, n'est pas ici de *juger* les modèles, d'édicter lesquels sont « bons » et lesquels sont « mauvais ». L'objectif est d'identifier les points forts, les points faibles et les pistes susceptibles d'améliorer la contribution de ces différents modèles à une politique de développement durable en matière énergétique.

5.1 La matrice modèles / critères

La matrice modèles / critères est représentée ci-dessous. Les abréviations pour les titres de ligne et de colonne sont les suivantes :

		MA	Macroéconomiques
ID	Interdisciplinarité	MU	Multi-agents
IG	Intergénérationnalité	EQ	Equilibre général
IC	Incertitude	OP	Optimisation
PA	Participation	BA	Bayésiens
LG	Local/global	SY	Systémiques

Tableau 16. La matrice modèles / critères pour la thématique de l'énergie

	ID	IG	IC	PA	LG
MA	0.5	-0.5	0.5	1.5	0.5
MU	1.5	1.5	1.5	0.5	1.5
EQ	0.5	1.5	-0.5	0.5	0.5
OP	0.5	0.5	0.5	-0.5	0.5
BA	1.5	-0.5	1.5	0.5	0.5
SY	1.5	1.5	0.5	1.5	-0.5

On peut rappeler que les cotes représentent la capacité de chaque classe de modèle à rendre compte du critère considéré. Etant entendu qu'à l'impossible nul n'est tenu, on comprend bien pourquoi certains critères sont parfois en décalage avec les objectifs poursuivis par certains modèles : par exemple, un modèle conçu pour des analyses de court terme est peu ou pas du tout adapté à la prise en compte du critère d'intergénéralité. Par contre, un modèle conçu pour le long terme n'est pas nécessairement à l'aise pour ce même critère : cela dépendra de que les concepteurs de ce modèle ont voulu mettre dans la dimension « long terme », ce qui peut être différent de la notion d'intergénéralité (voir l'analyse de ce critère dans le chapitre 2). L'interprétation de ces cotes doit donc se faire avec beaucoup d'attention.

Compte tenu des discussions qui se sont tenues lors de la Table ronde, certaines cotes ont été amendées par rapport à la matrice présentée dans le chapitre 3. On relèvera les points saillants suivants :

- Pour le critère interdisciplinarité : modèles d'optimisation, d'équilibre général ou macroéconomiques sont mis sur un pied d'égalité, mais les trois autres classes ont toutes une capacité à mieux rendre compte de ce critère ;
- Pour le critère intergénéralité : la capacité des modèles à rendre compte des générations, quelle que soit la nature de ces générations (voir la chapitre 2), explique les différences de cotes : les modèles de court terme sont évidemment les moins bien lotis ;
- Pour le critère incertitude : réduction de la cote pour les modèles d'équilibre général calculables compte tenu du fait que, malgré la possibilité de tests de sensibilité (en pratique, sous-utilisés), les coefficients des fonctions de comportement ne sont généralement pas estimés par des méthodes économétriques et ne peuvent donc être validés sur une base statistique, comme c'est le cas pour les modèles macroéconomiques ;
- Pour le critère participatif : amélioration du score des modèles macroéconomiques en vertu du processus de concertation mis en œuvre dans leur pratique ; par contre, réduction de la cote relative pour la dynamique des systèmes, souvent davantage (en tous cas à l'heure actuelle) aux mains d'experts et moins intégrés dans des processus participatifs structurés ;
- Pour le critère local/global : réduction de la cote pour les modèles bayésiens mais augmentation pour les modèles d'optimisation.

Pour rappel, des explications plus complètes sur ces différentes cotes ont été présentées dans le chapitre 3.

5.2 La matrice critères / problématiques

Les problématiques sont codifiées de la manière suivante :

RE	Energies épuisables
NU	Energie nucléaire
RR	Energies renouvelables
AC	Accès aux services énergétiques

CC	Changement climatique
UR	Utilisation rationnelle de l'énergie
SP	Santé et pollution

Les cotes , ainsi qu'expliqué précédemment, résultent de la sommation des cotes provenant des membres du Comité d'accompagnement et des chercheurs de l'IDD. Cette matrice est donc rigoureusement identique à celle construite et commentée dans le chapitre 4.

Chaque cote représente ici l'importance relative d'un critère pour l'analyse d'une problématique donnée dans sa dimension développement durable. La matrice se prête donc davantage à une lecture en colonne (par problématique) qu'en ligne.

Tableau 17. La matrice critères / problématiques pour la thématique de l'énergie

	RE	NU	RR	AC	CC	UR	SP
ID	3	6	5	3	6	4	4
IG	6	6	6	3	6	3	4
IC	4.5	6	3	3	6	2	4
PA	1	4	5	3	3	5	2
LG	5	4	4	4	6	4	3

5.3 La matrice modèles / problématiques

Cette matrice est le résultat du produit matriciel des deux matrices précédentes (se reporter au chapitre 2 pour une présentation détaillée du cadre formel). Les valeurs obtenues n'ont de signification que de manière ordinale, c'est-à-dire en comparaison avec les autres valeurs obtenues dans la matrice.

La ligne et la colonne TOT indiquent le score total pour chaque classe de modèle et chaque problématique. Pour en faciliter la lecture, ces totaux sont également exprimés en pourcentage de la somme des scores. L'interprétation de ces scores doit se faire avec précaution³² :

- En ligne, ce score indique la *capacité* d'une classe de modèles à rendre compte des enjeux en termes de développement durable de la thématique énergétique ;
- En colonne, ce score indique à quel point chaque problématique *intègre* des composantes d'un développement durable.

³² Cette interprétation a largement bénéficié des discussions qui se sont tenues lors de la Table ronde.

Il faut bien noter ici que deux classes de modèles peuvent avoir des scores identiques, mais pour des motifs différents : les motifs nous intéressent davantage que les scores, ces derniers n'ayant aucune signification *per se* compte tenu du fait que les classes de modèles n'ont pas, à l'origine, été développées pour évaluer les politiques en terme de développement durable. Par ailleurs, qu'une problématique ait un score plus faible qu'une autre ne signifie pas qu'elle est moins importante : cela illustre simplement qu'elle intègre moins d'enjeux en terme de développement durable, et ce dans le contexte méthodologique fourni par nos cinq critères.

Tableau 18. La Matrice Modèles / Problématiques pour la thématique de l'énergie

	RE	NU	RR	AC	CC	UR	SP	TOT	%
MA	4.8	11.0	10.5	8.0	10.5	11.0	6.5	62.3	10%
MU	28.3	35.0	29.5	21.0	37.5	22.0	23.5	196.8	32%
EQ	11.3	13.0	14.5	8.0	13.5	10.0	8.5	78.8	13%
OP	8.8	9.0	6.5	5.0	10.5	4.0	6.5	50.3	8%
BA	11.3	19.0	13.5	11.0	19.5	12.0	12.5	98.8	16%
SY	14.8	25.0	23.5	13.0	22.5	17.0	15.5	131.3	21%
TOT	79.0	112.0	98.0	66.0	114.0	76.0	73.0	618.0	
%	13%	18%	16%	11%	18%	12%	12%		47%

L'interprétation de cette matrice est la suivante. En colonne, on constate que, compte tenu des caractéristiques des classes de modèles considérées, les problématiques les mieux appréhendées sont le changement climatique et la gestion du nucléaire (à 18% toutes les deux) tandis que la problématique de l'accès aux services énergétiques est la moins bien lotie (avec 11%), quasiment logée à la même enseigne que les questions relatives à la santé, à la pollution et à l'utilisation rationnelle de l'énergie. On relèvera donc que les problématiques les moins favorisées par les classes de modèles retenues ici sont celles qui intègrent une forte composante sociale. Les modèles sont fort différentes du point de vue de leur capacité à rendre compte de ces problématiques, ce qui est beaucoup moins le cas pour le changement climatique par exemple. Les explications détaillées se trouvent dans les deux matrices précédentes.

En ligne, l'interprétation doit tenir compte à la fois de la capacité du modèle à tenir compte d'une critère, mais aussi de l'importance de ce critère pour l'analyse d'une problématique. Autrement dit, lorsqu'une cote faible dans la matrice *M.C* rencontre une cote forte dans la matrice *C.P*, la cote dans la matrice *M.P* est fortement réduite. Il n'est donc pas étonnant de trouver les modèles multi-agents en première position étant donné leur score de 1.5 pour quasiment chaque critère. Les réseaux bayésiens, par contre, voient leur cote globale réduite en raison de limites sur l'intergénérationnel, la participation et le local/global. Modèles d'équilibre général calculables et macro-économétriques sont proches, le premier étant davantage capable d'intégrer des composantes de long terme (notamment l'intergénérationnel).

5.4 Compte rendu de la Table ronde « énergie »

Le 19 juin 2003, une Table ronde a été organisée entre modélisateurs et utilisateurs de résultats de modèles sur la thématique énergétique. L'objectif de cette Table ronde n'était pas de présenter les résultats de la recherche mais d'organiser une discussion sur la contribution des modèles exploités à l'heure actuelle en Belgique en matière énergétique dans le cadre d'une politique de développement durable, et ce sur base du cadre méthodologique élaboré dans ce projet. Un effort d'explication de ce cadre était donc nécessaire, notamment, et cela s'est confirmé durant la Table ronde, concernant l'interprétation des cinq critères.

Une part importante du temps imparti (plus de la moitié de la matinée) avait été réservée à la discussion et de nombreuses idées originales ou inattendues ont été abordées. La participation a également été très importante (voir plus loin la liste des participants et des personnes invitées) : toutes les personnes conviées ont exprimé leur intérêt à participer à la Table ronde et, sur la trentaine de personnes contactées, seules quatre n'ont pas pu y participer.

La réunion était organisée de la manière suivante :

PREMIERE PARTIE : cadre méthodologique

1. Objectifs de la réunion et du projet de recherche
2. Présentation du cadre méthodologique: Critères / Problématiques / Modèles

DEUXIEME PARTIE : discussion utilisateurs / modélisateurs

1. Une synthèse de l'analyse des modèles
2. Une synthèse de l'analyse des problématiques
3. Discussion et pistes de recherche Cette section va exposer les objectifs de cette Table ronde, les principaux éléments issus des discussions et une évaluation globale.

Les « résultats » issus des discussions sur les matrices problématique / critères et modèles / critères ne sont pas repris ici car ils ne peuvent pas être considérés comme aboutis : ils nécessiteraient davantage de temps pour la discussion et pour parvenir à un consensus sur les critères et les problématiques (voir ci-après). Ce qui importait lors de cette Table ronde, c'était surtout d'établir une discussion entre modélisateurs et utilisateurs autour des enjeux soulevés par le développement durable. Ce dernier point est important car une mise en œuvre, « grandeur nature » de la méthodologie développée dans cette recherche exigerait de mettre en place un véritable processus participatif, ce qui déborde largement les objectifs de cette recherche.

5.4.1 L'organisation de la table ronde

En préparation à la Table ronde, une courte note avait été envoyée aux modélisateurs afin de les préparer à l'exercice qui leur était proposé : une analyse participative de la contribution de leur modèle à l'analyse de la problématique énergétique sous l'angle du développement durable. Il était proposé à chacun des modélisateurs responsables d'un type de modèle spécifique (GEM-E3, Hermès, EPM, GreenMod, Markal et CWS) de fournir sa propre analyse à travers la grille méthodologique développée dans le cadre de ce projet.

Une note préparatoire avait été envoyée préalablement aux modélisateurs. Elle était organisée de la manière suivante. La section 2 rappelait succinctement les objectifs de l'étude. La section

3 exposait les critères de durabilité retenus comme grille méthodologique. La section 4 proposait une méthode permettant d'évaluer la capacité des différents modèles à tenir compte de ces critères, suivant une codification standardisée : il était proposé aux participants-modélisateurs de la Table ronde de réfléchir à cette analyse et, si possible, de remplir la matrice proposée et de nous la renvoyer (par courrier postal, fax ou courrier électronique) au plus tard le 17 juin. L'exercice consistant à estimer quels degrés d'interdisciplinarité, de participation, etc., sont requis pour prendre adéquatement en compte les exigences en termes de développement durable d'une thématique donnée dans toute la diversité de ses problématiques exige une bonne compréhension de ce que signifie concrètement ces critères, mais aussi une connaissance suffisante des modèles considérés. C'est pourquoi il nous a paru pertinent de faire appel aux modélisateurs eux-mêmes.

5.4.2 *Les participants*

Francis Altdorfer	Econotec
Tom Bauler	ULB
Ali Bayar	ULB
Thomas Bernheim	Bureau fédéral du Plan
Francis Bossier	Bureau fédéral du Plan
Paul-Marie Boulanger	IDD
Thierry Bréchet	IDD et UCL
Philippe Constant	Econotec
Jacques Cornet	DGRNE, Région wallonne
Anne Fierens	SPF Politique Scientifique
Georges Jamart	SPF Politique Scientifique
Benoît Lussis	IDD
Viviane Planchon	Centre de Recherches Agronomiques
Hilde Van Dongen	SPF Politique Scientifique
Philippe Tulkens	Bureau fédéral du Plan

Les personnes qui ont manifesté leur intention de participer à la Table ronde mais n'ont pas pu le faire sont les suivantes :

Peter Wittoeck	SPF Santé Publique Sécurité de la Chaîne alimentaire et Environnement
Nicholas Christoforides	Commission européenne DG Recherche
Stef Proost	CES-KUL
Hugues Nolleveaux	DGTRE Région wallonne
Robert Oger	Centre de Recherches Agronomiques
Hadelin de Beer de Laer	SPF Développement Durable
Juliette de Villers	IBGE
Jean Houard	SES Région wallonne
Etienne Hannon	SPF Santé Publique Sécurité de la Chaîne alimentaire et Environnement
Denise van Regemorter	CES-KUL

5.4.3 Synthèse des discussions

La discussion a été menée critère par critère, sur base d'une double question :

Vous participez au processus de décision dans le domaine énergétique en tant que modélisateurs ou utilisateurs de résultats de modèles.

Pour chacun des cinq critères suivants:

- *Pensez-vous que l'exigence de développement durable implique que ce critère soit davantage pris en considération ?*
- *En tant que développeur de modèle ou en tant qu'utilisateur, comment le prenez-vous en compte et/ou comment envisageriez-vous de le faire à l'avenir ?*

Un formulaire avait été remis aux participants en début de réunion afin qu'ils puissent y noter leurs idées ; ce même formulaire (voir en annexe) a servi de ligne directrice pour la discussion. Il est donc naturel de synthétiser les discussions critère par critère. À titre indicatif, la discussion a duré une bonne heure et demi, soit une bonne vingtaine de minutes par critère, sachant que le dernier (local/global) n'était que peu pertinent pour cette thématique (voir ci-dessous). Une synthèse des idées discutées est présentée ci-après ; l'analyse de ces discussions est effectuée dans la section suivante consacrée à l'évaluation de la Table ronde.

5.4.3.1 Interdisciplinarité

Ce critère est certainement le plus évident dans la mesure où le bon sens accepte sans effort l'idée qu'une approche interdisciplinaire est nécessaire pour appréhender le développement durable. Il est aussi celui qui a été le plus, et depuis longtemps, mis en exergue. Néanmoins, et c'est également un fait connu, ce n'est pas une notion facile à comprendre et c'est encore moins une notion facile à transformer en pratique. Ces différents éléments ont transpiré lors de la discussion, mais une idée importante a été évoquée : il n'est pas toujours nécessaire de « faire de l'interdisciplinarité ». L'interdisciplinarité, c'est exploiter des liens formels entre des domaines scientifiques contingents (voir la discussion de critère en chapitre 1) ; cette exploitation est pertinente car elle ajoute du sens : une synergie apparaît là où la combinaison des disciplines apporte davantage que leur simple juxtaposition. Si cette synergie n'existe pas, il est inutile et contre-productif de vouloir « par principe » faire de l'interdisciplinaire.

Cette idée est un peu à contre-courant de la mouvance actuelle où l'on voudrait que tout soit interdisciplinaire... Elle pose fort justement la question de la pertinence de cette exigence du point de vue de la contribution à la connaissance. Parfois, une bonne analyse mono-disciplinaire vaut mieux qu'une mauvaise analyse interdisciplinaire. Cette idée est à relier à la perte d'expertise spécifique associée au souci d'interdisciplinarité. L'exigence d'interdisciplinarité possède effectivement des coûts importants, et pas toujours évidents *a priori* : temps nécessaire pour se comprendre, perte de spécialisation, efforts de communication... Ces coûts contre-balancent-ils les bénéfices ? La question est loin d'être triviale : suivant la question posée, le problème appréhendé, ce bilan peut être positif ou négatif.

Par rapport à cette discussion, deux éléments doivent être mis en avant :

- En premier lieu, il ne faut pas associer l'interdisciplinarité et à une sophistication gratuite ou une dimension excessive des modèles. Ces deux derniers travers n'ont rien à voir avec la recherche des interrelations entre domaines scientifiques ;
- En second lieu, justement, l'idée que l'interdisciplinarité n'est peut-être pas toujours nécessaire rencontre l'argument que, pour le savoir, il faut procéder a priori à une recherche de ces interrelations entre domaines scientifiques puis, ensuite, montrer quelle serait la contribution d'une analyse interdisciplinaire. Il est difficile d'arguer que l'interdisciplinarité n'apporte rien si on ne l'a pas montré, ce qui exige d'emblée une vision interdisciplinaire de la question traitée. Autrement dit, lors de la phase de diagnostic, quel que soit le problème à analyser, une vision résolument interdisciplinaire est clairement requise lors de la phase de recherche de l'outil ou du modèle adéquat, quitte ensuite à privilégier certaines approches compte tenu des spécificités des questions appréhendées.

Dans cet ordre d'idées, il a été mis en avant la nécessité d'adopter une approche interdisciplinaire lors des trois étapes que constituent la vie d'un modèle : sa conception, son exploitation et l'interprétation de ses résultats. Enfin, le rôle des indicateurs comme vecteur de communication entre disciplines a été souligné : il est patent, à l'heure actuelle, que les indicateurs demeurent sous utilisés dans le dialogue scientifique.

5.4.3.2 Intergénérationnalité

Une discussion importante s'est faite autour de l'interprétation de ce critère. Les concepts qui avaient été exposés dans les notes préliminaires et en début de réunion n'avaient visiblement pas été compris de la même manière par tout le monde. Sans revenir ici sur le sens à donner à ce critère (voir le chapitre 2 pour cela), il importe de bien distinguer entre deux notions :

- L'aspect « technique » : cet aspect cherche à voir si les modèles peuvent être qualifiés d'intergénérationnel ou non. Cet aspect « technique » fonde l'acception développée dans cette recherche, notamment autour de l'idée de dynamique de long terme et de prise en considération d'acteurs impliqués dans le développement durable mais absents aujourd'hui, à savoir les générations futures. La question posée est donc la suivante : est-ce que les modèles rendent compte, *concrètement*, des dynamiques complexes de long terme et de l'existence des générations futures ?
- L'aspect « équité » : dans le contexte de cette étude, l'équité dépasse la question de savoir si les modèles prennent en compte ou non cette notion. Il s'agit d'une notion qui vient après l'aspect concret. À notre sens, le développement durable est d'ailleurs par essence un problème d'équité intra- et inter-générationnel, ainsi que le Rapport Brundtland l'énonce dans ce qui reste la meilleure définition du développement durable.

Globalement, les modèles de long terme se sont considérés comme intergénérationnels, même si le second point demeure généralement sous-développé, l'aspect technique associé au long terme étant considéré comme important.

5.4.3.3 Risque et incertitude

Il est ressorti de la discussion que le décideur est clairement sous-éduqué en matière statistique : de l'avis des modélisateurs, il serait techniquement possible, la plupart du temps, d'exposer les résultats issus des modèles sous la forme d'intervalle de confiance et/ou de réaliser des tests de sensibilité de manière plus systématique.

De l'avis général, il serait nécessaire de développer l'usage du principe de précaution dans les processus de décision et dans l'exploitation des modèles.

5.4.3.4 Participation

Étonnamment, alors que ce critère est généralement méconnu, la plupart des modélisateurs présents se sont rendus compte qu'ils procédaient à des processus relevant (plus ou moins) de la participation des parties prenantes. À l'instar de Mr. Jourdain, sans le savoir, mais donc également sans que cela relève d'une approche structurée et cohérente. Par exemple, certains acteurs sont concernés et pas d'autres ; ou alors la participation repose sur des structures institutionnelles pré-existantes. L'idée que cette participation pourrait être renforcée a été discutée, notamment au stade de l'élaboration des scénarios de simulation.

Le point de savoir si les parties prenantes pouvaient ou devaient être davantage informées des choix sous-jacents aux fondements théoriques ou aux options méthodologiques des modèles n'a pas donné lieu à discussion.

Par contre, il a été mis en avant le fait que l'organisation de la participation est plus ou moins aisée suivant le degré de stylisation (ou d'abstraction) du modèle et son niveau d'agrégation. Il est en effet évident que plus le modèle est local (proche des préoccupations des individus) et plus il est empirique sans théorie, plus il est susceptible d'être « compris » par les parties prenantes locales. Lorsqu'un modèle est mondial, basée sur des concepts théoriques ardues ou des méthodes mathématiques sophistiquées, le dialogue est plus malaisé, ne serait-ce qu'au stade de savoir quelles sont les parties prenantes à mettre autour de la table et quelle est leur implication dans la politique simulée... Il ressort de ce point que la participation se décline différemment suivant le niveau considéré (local/global) et l'implication des parties prenantes dans la politique considérée. Voir sur ce point les commentaires apportés sur le critère suivant (local / global).

L'importance des biais stratégiques a été mise en avant : il existe cependant des méthodes pour contrer ces problèmes (méthodes délibératives, par exemple) et un renforcement de leur usage au sein du processus de décision serait certainement utile.

Enfin, le contenu normatif de la décision ne doit pas être occulté : ceci justifie d'autant plus le recours à des approches participatives.

5.4.3.5 Local / global

Ce dernier critère s'est révélé peu pertinent pour la thématique énergétique (voir, pour une discussion, le chapitre 3) mais surtout pour la catégorie de modèles présents à cette Table ronde, modèles essentiellement belges. En outre, mais ceci sera un point discuté dans la section suivante, cette notion est certainement la plus difficile à introduire, techniquement, dans un modèle. Pour la thématique de l'aménagement du territoire, par contre, ce critère prend une dimension bien plus cruciale.

Néanmoins, en lien avec la discussion sur les possibilités d'une approche participative, il est intéressant de relever que, suivant le type de modèle et ses caractéristiques techniques (niveau d'agrégation, sophistication, théorie...), la participation est potentiellement d'autant plus étendue que le modèle distingue et articule les dimensions locales et globales.

5.4.4 Bilan de la Table ronde

Cette Table ronde a clairement rempli sa fonction : faire discuter modélisateurs et utilisateurs autour de l'amélioration de l'usage et de la conception des modèles en matière énergétique pour une politique de développement durable. Un certain nombre d'idées inattendues ont été discutées. La réunion a donné lieu à discussion, mais parfois au-delà des objectifs assignés, et ce pour plusieurs raisons. En premier lieu, il est apparu que le cadre méthodologique n'avait pas toujours été bien compris et, parfois, les discussions ont dévié de l'objet de la Table ronde pour revenir sur certains concepts qui ne semblaient pas avoir exactement le même sens pour tout le monde. Le meilleur exemple a été le critère d'intergénéralité.

La difficulté à entrer dans le cadre méthodologique peut être décrite et s'expliquer par les éléments suivants :

- Pour les chercheurs qui devaient exposer ce cadre méthodologique (objectif de l'étude, justification et définition des critères, matrices...), il est vite apparu que beaucoup d'éléments étaient à expliquer et que le défi n'était pas facile à relever dans les délais impartis (*grosso modo*, une heure et demi d'exposés). L'alternative aurait été d'envoyer à tous les participants les notes de recherche, mais il était abusif d'exiger de leur part de lire autant de pages en préparation à la Table ronde ;
- L'objet de la Table ronde n'était pas d'exposer les résultats de nos propres travaux mais de faire discuter, dans un cadre méthodologique donné, utilisateurs et modélisateurs : c'était un peu un « test *in vitro* » pour ce cadre méthodologique, sans pour autant que l'on demande explicitement aux participants de juger le-dit cadre : nous en avons logiquement tiré les leçons à cet égard (voir ci-dessous) ; en substance, la Table ronde faisait partie intégrante de l'étude, ce que d'aucuns n'ont pas compris, visiblement trop habitués à des réunions dans lesquelles les chercheurs exposent leurs résultats et les participants les discutent...
- Néanmoins, cette Table ronde ne consistait pas en une mise en œuvre « grandeur nature » de la méthodologie ou de toutes ses potentialités en matière de participation : ce point explique pourquoi il avait été demandé aux modélisateurs de fournir des cotes pour leur modèle sur les différents critères, tout comme il avait été discuté avec le comité d'accompagnement des cotes pour les thématiques, bien que cela ne constitue pas des cotes « définitives » qui aient, en soi, une valeur absolue.

Sur le point de la valeur à octroyer aux cotes fournies par les modélisateurs, il faut comprendre que l'objet était de les amener à réfléchir, *via* les cinq critères, aux possibilités d'accroître la capacité des modèles pour une prise de décision en matière de développement durable : cette analyse a été faite par nous même dans le chapitre, en toute indépendance, et l'idée n'était évidemment pas d'entrer dans un débat avec les modélisateurs sur ces cotes. Autrement dit, les cotes comptaient moins, pour nous, que les idées qui allaient résulter des questions que se poseraient les modélisateurs et les utilisateurs sur la capacité des modèles à contribuer à la prise de décision en matière de développement durable. Il est vite apparu que la plupart des participants avaient tendance à segmenter les questions alors qu'une approche conforme au développement durable implique d'adopter systématiquement une vision englobante (voir la discussion ci-dessus sur le critère d'interdisciplinarité). La méthodologie développée ici pousse très loin cette vision englobante puisque, *via* les cinq critères, eux-même inter-reliés (voir le chapitre 2), il est impossible de dissocier l'analyse des modèles de celle des problématiques. De ce point de vue, le cadre méthodologique a l'avantage d'obliger à penser une thématique dans sa globalité, même si cette thématique est appréhendée sous divers angles, car ces angles sont interdépendants. Le fait que les critères soient appréhendés sous l'angle de leur contribution

méthodologique pour l'amélioration des modèles existants a également été mal compris : il ne s'agit pas, ici, d'arrêter une définition pour ces cinq critères mais de voir comment les modèles peuvent en rendre compte et quelle est la pertinence de ces critères pour les problématiques considérées : l'approche n'est pas ontologique ou sémantique mais *méthodologique*. Enfin, et c'est un point assez frappant, les utilisateurs se sont nettement moins exprimés que les modélisateurs : il est naturel que ces derniers aient tendance à justifier les options méthodologiques de leur propre modèle, mais nous aurions pu nous attendre à davantage de requêtes de la part des utilisateurs... Ce point n'est pas facile à expliquer et mériterait davantage d'exploration (par exemple en allant en discuter directement avec ces personnes). Il semble régner chez certains utilisateurs une relative mé-compréhension du fonctionnement des modèles et du rôle de la modélisation dans le processus de décision. Paradoxalement, cette Table ronde a peut-être révélé un hiatus inattendu de ce point de vue.

Chapitre 6. Adéquation Modèles/Thématique/Critères : l'aménagement du territoire

6.1 La matrice modèles / problématiques

Nous avons vu que la prise en compte du développement durable confronte les modèles à de nouvelles contraintes – outre celles traditionnellement liées à l'activité de modélisation et qui ont trait à la pertinence, à la cohérence et à la mesurabilité – que nous avons regroupées sous cinq critères : l'interdisciplinarité, la prise en compte des incertitudes, le traitement des temporalités différentes et de l'équité intergénérationnelle, le traitement des interactions entre niveaux (local-global) et la participation des parties prenantes.

Nous avons vu aussi que la thématique de l'aménagement du territoire dans une perspective de développement durable s'ouvrait sur une pluralité de problématiques partielles : la mobilité, l'énergie, la santé, la pauvreté, la biodiversité, l'eau, les aménités paysagères. On peut, en appliquant la méthode utilisée dans la section 4.2 évaluer *a priori* l'adéquation des différentes classes de modèles à la prise en compte de ces problématiques. Le tableau 19 page suivante présente le résultat de la multiplication de la matrice *M.C* (modèles-critères) par la matrice *C.P* (critères-problématiques) telle qu'élaborée en comité d'accompagnement.

Les modèles Multi-Agents et de Dynamique des systèmes ressortent comme étant à première vue plus aptes à prendre en compte l'ensemble des problématiques que les modèles d'équilibre général ou d'optimisation. Cela n'est évidemment guère surprenant. Les modèles économiques (équilibre général, macroéconométriques) ne sont pas conçus pour cela. La « pénalité » qui les frappe ici ne doit pas faire oublier qu'ils sont avant tout utilisés pour simuler et prévoir l'évolution des activités économiques, du revenu global et de l'emploi et que si ces problématiques avaient été prises en compte dans la matrice, les résultats de l'évaluation auraient été très différents pour ce qui les concerne. Mais il ne faut pas perdre de vue que notre objectif, ici, est d'explorer les potentialités des différentes approches pour la prise en compte du développement durable. Dans le cas de l'aménagement du territoire, cela passe par l'ouverture vers les problématiques retenues ici. On verra, d'ailleurs, que certains outils (TRANUS, MEPLAN, etc.) pourtant solidement ancrés dans la tradition des modèles économiques peuvent constituer des instruments intéressants d'aide à la décision en matière d'affectation de l'espace et de mobilité, dans une optique de développement durable, à certaines conditions qui seront analysées par la suite.

Tableau 19. La matrice « Modèles-Problématiques »
pour la thématique de l'aménagement du territoire

	Energie	Biodiversité	Eau	Mobilité	Pauvreté-exclusion	Santé	Aménités	TOTAL	%
MA	8,8	11,8	12,0	11,3	11,0	11,8	10,3	76,8	0,12
MU	21,3	31,3	34,0	24,8	25,0	27,3	24,8	188,3	0,30
EQ	10,8	9,8	15,0	12,3	11,0	10,8	14,3	83,8	0,13
OP	3,8	7,8	8,0	4,3	5,0	5,8	4,3	38,8	0,06
BA	7,3	17,8	17,0	11,8	13,0	15,3	10,3	92,3	0,15
SY	15,3	18,3	25,0	21,8	19,0	20,3	23,8	143,3	0,23
TOTAL	67,0	96,5	111,0	86,0	84,0	91,0	87,5	623,0	1,00
%	0,11	0,15	0,18	0,14	0,13	0,15	0,14	1,00	0,00

Quant à la domination du paradigme multi-agents, elle n'a rien de surprenant : c'est celui qui se prête le mieux à la représentation de l'espace. Or, ce qui ressort de l'analyse menée ci-dessous sur certaines incarnations des types de modèles est que la prise en compte de l'espace constitue le facteur le plus important d'ouverture aux critères et aux problématiques du développement durable.

Dans les pages qui vont suivre, en effet, nous allons pénétrer au cœur de quelques outils de modélisation afin, d'une part, de mieux cerner ce que signifient concrètement et opérationnellement les critères que nous avons mis en avant et, d'autre part, comment les problématiques mentionnées ci-dessus y sont – ou pourraient être – prises en compte. La démarche suivie ici diffère donc de celle que nous avons adoptée pour la thématique de l'énergie. C'est que l'approche « participative » que nous avons pu suivre pour cette dernière se justifiait par l'existence d'une culture, bien enracinée dans notre pays, de construction et d'utilisation de modèles énergétiques. On peut considérer que tous les « paradigmes » de modélisation en la matière sont représentés par l'une ou l'autre équipe de développeurs, que ce soit dans les universités, les administrations ou le secteur privé. Il n'en va pas de même dans le domaine de l'aménagement du territoire. Le nombre de producteurs et d'utilisateurs de modèles d'aide à la décision dans cette thématique y est beaucoup plus réduit, l'offre en matière de modèles de ce type étant, semble-t-il, limitée à une toute petite poignée d'acteurs qui sont loin évidemment de représenter un échantillon suffisamment diversifié des approches et des outils existants. Nous n'excluons cependant pas la possibilité que cette impression soit l'effet de notre manque de familiarité avec le domaine. Si cela s'avérait être le cas, il serait toujours possible d'organiser dans les mois qui viennent, et sur base de ce rapport, un séminaire semblable à celui que nous avons tenu autour des modèles énergétiques. Par ailleurs, il nous est apparu que les modèles d'aide à la décision en matière d'occupation de l'espace et de transport étaient très mal connus de la plupart des chercheurs dans le domaine du développement durable. Or, nous sommes convaincus, comme on le verra dans la conclusion de ce chapitre, que leur pertinence

excède largement le champ de l'aménagement du territoire *stricto sensu*, et même, qu'ils pourraient bien représenter la voie royale pour une modélisation en termes de développement durable. C'est pourquoi il nous a paru utile de leur consacrer un important chapitre et de s'attarder même sur certains d'entre eux plus représentatifs, plus diffusés dans notre pays ou encore plus prometteurs, à nos yeux.

Il n'était, en effet, pas non plus possible, ni utile du reste, d'analyser en profondeur chacun des nombreux modèles ou outils de modélisation existants³³ dans le champ de l'aménagement du territoire et de la mobilité. Nous avons donc choisi de nous focaliser sur un petit nombre d'entre eux représentatifs de certaines approches identifiées dans le chapitre 2 : la dynamique des systèmes, l'équilibre général et l'économétrie, la modélisation multi-agents.

Les modèles de dynamique des systèmes seront abordés à travers une brève présentation de leur ancêtre commun, « Urban Dynamics » publié par J.Forrester en 1969 et une application plus récente, Ugrow.

Les modèles multi-agents seront envisagés à travers deux applications assez différentes qui nous permettront de prendre la mesure des possibilités de ce paradigme dans la thématique qui nous occupe.

En fait, seules les approches en termes de « dynamique des systèmes » et de « multi-agents » sont représentées à l'état pur³⁴ dans les outils ou applications existants. Pour ce qui est des autres, ils combinent le plus souvent plusieurs paradigmes : analyse input-output, équilibre partiel spatialisé, économétrie³⁵. C'est particulièrement vrai pour les modèles intégrés «aménagement du territoire-transports » (LUTM : Land-use and Transportation Models). Parmi les plus représentatifs de ces derniers, nous avons retenu TRANUS et UrbanSim. La sélection de TRANUS se justifie pour plusieurs raisons. Tout d'abord, il a fait l'objet d'au moins une application en Belgique (étude de l'impact d'un RER à Bruxelles) et a été utilisé par Safonov et Hecq³⁶ dans leur étude sur les émissions de GES de la région bruxelloise. Autre avantage : sa documentation est complète et aisément accessible. Enfin, d'autres outils célèbres, comme MEPLAN, s'en sont inspirés, en dérivent directement ou en sont très proches dans les options fondamentales. De surcroît, TRANUS est un outil déjà éprouvé (qui continue de bénéficier d'améliorations constantes, cependant) et qui a fait l'objet de nombreuses applications opérationnelles. Le cas d'UrbanSim est légèrement différent dans la mesure où il est encore en plein développement même s'il peut aussi se targuer de l'une ou l'autre application. Lui aussi dispose d'une documentation complète et accessible. Il fait d'ailleurs l'objet d'une licence « open source » et son code (Java) est donc disponible. Signalons encore que nous avons

³³ Parmi les outils opérationnels, les plus connus sont : CUF-1, CUF-2, DELTA, DRAM/EMPAL, GSM, INDEX, IRPUD, LTM, LUCAS, Markov, MEPLAN, METROSIM, SAM-IM, SLEUTH, Smart Growth, Smart Places, TRANUS, Ugrow, UPLAN, Urbansim, What if.

³⁴ En fait, les modèles multi-agents sont souvent associés, dans le domaine de la gestion de l'espace et des ressources naturelles, à une modélisation de l'espace par les automates cellulaires. On peut considérer que celle-ci correspond à une modélisation multi-agents étendue où les cellules de l'espace sont considérées également comme des agents.

³⁵ Nous laisserons de côté les applications relevant d'une approche en terme d'optimisation centralisée qui pour n'être pas tout à fait absentes dans le domaine, demeurent assez marginales.

³⁶ Safonov, P. et W.Hecq, 2000, *Dynamic ecological-economical modelling for regional planning : A case study of environmental impacts of mobility induced by major policy options in the Brussels-Capital Region*, CEESE, Bruxelles.

accordé une place prépondérante à TRANUS pour une raison bien simple : il est représentatif du paradigme encore largement dominant dans le domaine des modèles LUTM et est d'ailleurs considéré comme l'état de l'art en la matière. Il était donc particulièrement intéressant d'aller voir d'un peu plus près ce qui est considéré comme tel par les spécialistes du domaine.

Avant de les analyser plus en profondeur, il convient cependant d'opérer un détour préalable par quelques notions et modèles théoriques qui se trouvent au fondement de la plupart de ces modèles opérationnels.

6.2 Les modèles d'usage du sol et de transport : sources théoriques

Le développement de modèles opérationnels pour aider à la prise de décision en matière de politique d'aménagement du territoire, de croissance urbaine et de transport date de la fin des années 1960 aux Etats-Unis. Leur objectif est double : prévoir simultanément la localisation dans l'espace des différentes activités (production industrielle, services, logements, etc.) et les flux de marchandises et de populations entre les différentes zones géographiques. Pour ce faire, ils s'appuient sur quelques grands modèles théoriques d'occupation de l'espace d'une part et d'interaction spatiale de l'autre. Dans la première catégorie on rangera les modèles économiques fondés sur les fonctions de rente urbaine (« bid-rent ») et les modèles de choix discret. Dans la seconde, les modèles gravitationnels et les modèles inputs-outputs. Les modèles d'interaction spatiale ont principalement³⁷ pour objet la prévision de l'importance et de la direction des flux (de travailleurs, de consommateurs, de marchandises, etc.) entre différentes zones, alors que les modèles d'occupation de l'espace ont pour objet la localisation dans l'espace des différentes activités et donc des différents agents (entreprises, commerces, ménages, etc.)

6.2.1 Les modèles gravitationnels

Ils consistent en une importation dans le domaine géo-spatial de l'équation de Newton exprimant la force d'attraction entre deux corps comme directement proportionnelle au produit de leur masse et inversement proportionnelle au carré de leur distance. Cette équation peut, en effet, moyennant quelques adaptations, rendre compte des flux de population et de biens économiques entre deux villes en fonction de leur taille respective (population) et de la distance qui les sépare, la notion de distance pouvant être prise au sens large de durée et de coût du déplacement entre elles, prenant donc en compte les performances des infrastructures de transport entre les deux zones.

Formellement, le modèle gravitationnel s'exprime comme suit :

$$T_{ij} = k \cdot W_i W_j / d_{ij}^n$$

Où T_{ij} = les flux entre la zone i et la zone j sont une fonction:

1° de la capacité de la zone i à attirer les flux (son attractivité = W_i)

2° de la capacité de la zone j à créer des flux de sortie (sa répulsivité = W_j)

³⁷ Ils peuvent cependant servir de base à des fonctions de localisation basées sur l'attractivité relative

3° de la distance entre les deux zones (d_{ij})

4° de la pondération attachée à la distance (η)

Le facteur k = constante d'échelle.

On voit que les flux sont la résultante de forces d'attraction et de forces de répulsion. Empiriquement, les modèles gravitationnels sont calibrés soit sur les flux réels (observés) de départs (« *production constraints* »), soit sur les flux réels d'arrivées (« *attraction constraints* ») soit sur les deux. Une autre approche fait appel au concept d'entropie et à sa maximisation

6.2.2 Les modèles input-output

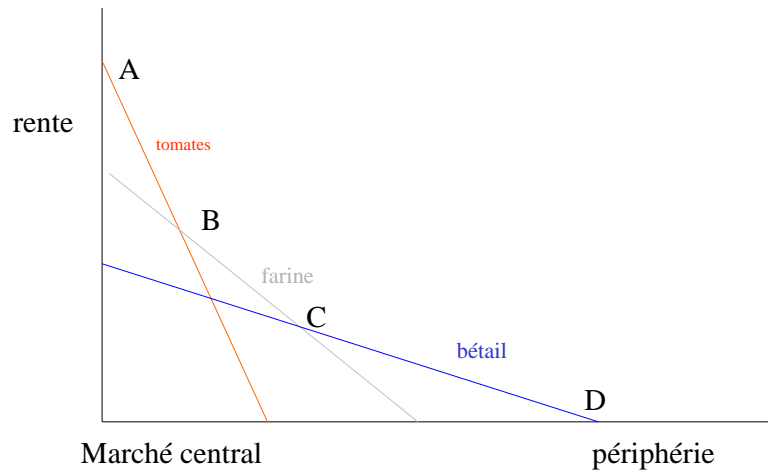
Ceux-ci sont basés sur l'application au domaine spatial des matrices input-output macrosectorielles de Léontief, Les échanges de biens, de services et de population entre les différentes zones urbaines sont synthétisés dans une matrice, dite O-D (origine-destination) dont la construction est basée sur l'observation des flux réels entre régions. Les différentes zones sont traitées comme des économies à part entière qui produisent, consomment, importent et exportent. Les échanges entre zones sont exprimés en termes monétaires et pilotés par une demande externe qui génère les exportations³⁸. Les flux monétaires sont convertis en flux de biens et de services et affectés à des modes de transport. Les modèles MEPLAN et TRANUS utilisent cette approche.

6.2.3 Le modèle monocentrique et les courbes de « bid-rent »

La quasi totalité des outils de modélisation destinés à l'aide à la décision repose sur des fondements analytiques et descriptifs qui remontent au début du XIX^{ème} siècle. Leur base commune est le modèle de von Thunen (1826) qui vise à rendre compte de la répartition des différentes zones agricoles autour d'un centre (marché). Dans ce modèle simplifié, le centre est un lieu de marché où s'échangent les produits agricoles venant de la périphérie. Autour de ce centre, l'espace est homogène et tous les points de celui-ci situés à égale distance du centre sont identiquement accessibles. Les produits diffèrent entre eux quant à leur poids et à leur vitesse de dégradation. Les coûts de transport sont donc fonction de la distance entre un point quelconque de l'espace et le centre ainsi que du poids et de la capacité de conservation des produits. Par ailleurs, seuls les coûts du transport influent sur les profits des producteurs agricoles. Tout naturellement, les productions les plus pondéreuses et les plus périssables occuperont les terres les plus proches du centre et, au fur et à mesure que l'on s'en éloignera, elles laisseront la place à des produits moins périssables et moins coûteux à transporter. Le graphique ci-dessous illustre ce modèle. A chaque production (tomates, farine, bétail) correspond une courbe de demande spécifique pour la localisation par rapport au centre-ville. Les producteurs de tomate sont, dans cette illustration, ceux qui sont prêts à payer le plus pour pouvoir occuper les zones les plus proches du centre, puis les producteurs de farine puis les éleveurs de bétail. La courbe de demande est définie par les points A,B,C,D.

³⁸ Ce qui situe ces modèles dans la lignée de la théorie du développement dite de « la base », signifiant par là que le développement d'un territoire quelconque est basé fondamentalement sur ses exportations, celles-ci induisant des activités secondaires en son sein.

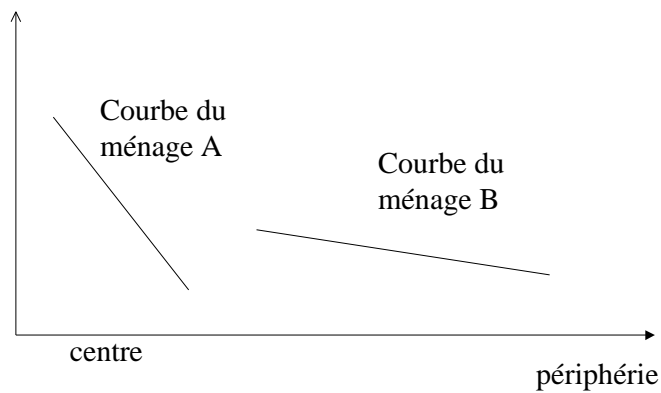
Le modèle de von Thünen



1

Cette vision est au cœur du « bid-rent model », développé par Alonso et Muth qui rend compte des affectations du sol autour d'un centre urbain en fonction des rendements décroissants des diverses utilisations de l'espace selon son éloignement du centre. Pour Alonso, les ménages par exemple, cherchent à maximiser leur utilité en choisissant le lieu de résidence en fonction de deux paramètres économiques : le coût du logement et le coût du transport. Il en résulte une courbe d'offre des ménages exprimant combien les ménages sont prêts à payer pour résider dans les différentes zones. C'est l'équilibre entre offre et demande sur le marché immobilier qui fixe les prix et les usages du sol.

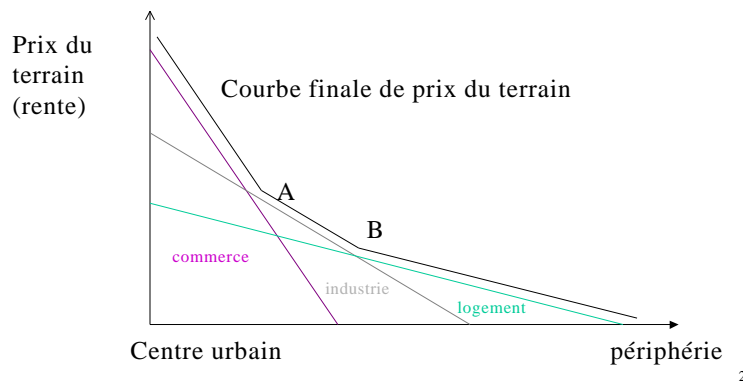
Le choix du lieu de résidence (Alonso)



3

Cette approche porte le nom de « bid-rent theory », pour exprimer l'idée que l'affectation du sol aux différentes fonctions concurrentes résulte d'un processus d'enchères entre celles-ci. Chaque parcelle est utilisée par l'activité qui offre la plus haute enchère pour l'occuper et donc par l'activité qui en retire l'utilité maximum.

C'est ce que montre le schéma ci-dessous : en haut de A c'est le commerce qui offre l'enchère la plus haute ; au point A l'industrie surenchérit sur le commerce ; au point B c'est le logement qui surenchérit sur l'industrie. La rente foncière est une fonction décroissante de la distance par rapport au centre urbain. Dans le graphique ci-dessous elle passe par les points A et B.



Cette théorie est dite « monocentrique » parce qu'elle postule l'existence d'un centre unique (marché ou centre commercial) où les différents biens peuvent s'échanger. L'espace autour de ce point central peut être affecté à différentes activités. Dans le modèle original de von Thünen, il s'agit de production agricole mais dans ses développements récents, toutes les activités économiques et résidentielles sont prises en compte et le centre n'est plus seulement le lieu d'un marché mais un centre urbain où s'effectuent toutes sortes d'activités économiques.

6.2.4 Les modèles écologiques

A côté de ces modèles explicatifs, on trouve des modèles plus largement descriptifs basés sur une approche écologique comme le modèle de croissance urbaine de l'école de Chicago (Burgess (1927) qui décrit la croissance de cette ville comme une expansion sous forme de cercles concentriques autour du centre d'affaires (CBD : Central Business District). Le premier cercle est constitué d'une zone de transition caractérisée par une importante rotation des implantations tour à tour de logements résidentiels de standing et de bureaux, suivie d'une zone industrielle d'usines et de logements ouvriers, puis d'une zone résidentielle pour classe moyenne pour finir par une périphérie suburbaine comprenant des logements de meilleure qualité et peuplée de navetteurs. Ce modèle a été repris par Hoyt (1939) pour expliquer la ségrégation socio-spatiale en quartiers différenciés selon le statut social puis étendu pour donner lieu à une vision intégrant une multiplicité de noyaux (*multiple nuclei model*). Celle-ci renonce donc à ce qui constituait le point commun des modèles économiques et écologiques : le caractère monocentrique.

6.3 Les principaux modèles appliqués

6.3.1 Les modèles d'économie spatiale

6.3.1.1 TRANUS

TRANUS® est un modèle intégré LUTM, développé essentiellement par T. de La Barra et maintenu par une compagnie privée vénézuélienne, appelée MODELISTICA. Il peut s'appliquer indifféremment à une ville ou à toute une région et a pour objet la simulation des politiques et projets d'aménagement du territoire et de mobilité en termes d'occupation de l'espace et de flux de transport et l'évaluation de leurs effets en termes sociaux, économiques, financiers et énergétiques.

Pour ce faire, le modèle calcule à chaque intervalle de temps (5 ans généralement) la localisation des ménages, des activités et des emplois, le changement dans les prix des terrains, la demande de transport, les déplacements effectifs et leur affectation aux différents modes.

Les bases théoriques de Tranus sont nombreuses : la théorie des fonctions « bid-rent » pour déterminer le prix d'équilibre des terrains, les matrices input-output pour générer les flux de transport et les échanges inter-zones, la théorie du choix discret pour représenter les choix des ménages en matière de localisation et mode de transport, etc.

Le modèle est constitué de deux sous-systèmes et d'une interface entre eux, à savoir:

- le système de l'activité ;
- le système du transport ;
- l'interface activité-mobilité.

6.3.1.1.1 Le système de l'activité

Le système de l'activité permet de simuler une économie spatiale. La région ou la ville est divisée en zones ou parcelles et le modèle simule la localisation des différentes activités dans les zones ainsi définies ainsi que les interactions qui s'établissent entre elles.

Les activités sont donc modélisées par des matrices « input-output » spatialisées qui représentent les échanges entre secteurs sachant que le terme de secteur reçoit ici une acception beaucoup plus large que dans son usage strictement économique. Peuvent recevoir le statut de secteur aussi bien les catégories économiques habituelles (agriculture, services, etc.), que les facteurs de production (capital, travail), la population, le type de bâti, etc. Un secteur peut donc être exprimé en unités aussi différentes que la monnaie, des individus, des hectares, des emplois, etc. Chaque secteur possède un certain nombre d'attributs qui peuvent être selon les cas : une production, des coûts de production, une demande, une valeur ajoutée, un prix, etc. Le nombre et le type de secteur n'est pas fixé une fois pour toutes mais s'établit selon les besoins de l'application.

Une distinction importante est opérée entre secteurs transportables et non-transportables. Un secteur est transportable si sa production peut être consommée dans une autre zone spatiale que celle de sa production. Par exemple, une activité de production localisée dans une zone peut employer des travailleurs provenant d'une autre zone, la sidérurgie implantée dans la zone A peut utiliser du coke en provenance de la zone B, etc. En revanche, un immeuble ne peut être

utilisé que là où il est produit. Il en va de même pour le sol. Le propre des secteurs transportables est de générer des flux qui transitent par un système de transport, lequel impose des coûts aux transactions qui l'empruntent.

Une autre distinction importante est celle qui distingue les activités « basiques » des activités induites. Les premières sont exportatrices par rapport à l'aire définie et leur implantation est exogène au modèle, puisque la demande auxquelles elles répondent est générée dans un espace qui n'est pas pris en compte au sein du modèle et que l'on désigne par « reste du monde ». Les autres activités sont induites par les activités exportatrices et désignent principalement la fourniture de biens et services aux industries basiques et à la population attirée par elles dans la zone. A titre d'exemple, dans son application à la ville de Lyon, les secteurs suivants ont été définis :

1° Activités :

- basiques : industrie lourde, industrie légère, services ;
- induites : services, commerce de détail, commerce de gros et grandes surfaces, enseignement ;

2° Population (ménages) :

- Cadres et professions libérales (supérieures)
- Employés (revenu > 12500 FF/mois)
- Employés (revenu <= 12500 FF/mois)
- Ouvriers et chômeurs
- Non-actifs et faible revenu.

3° Usages du sol :

- Résidentiel individuel (maison unifamiliale)
- Résidentiel collectif (immeubles)
- Mixte résidentiel (immeubles + activités induites), partie immeubles
- Industriel basique
- Industriel induit
- Mixte activité (mélange activités induites/immeubles), partie activités
- Résiduel (non-construit)

La localisation des acteurs (ménages, entreprises) résulte d'un équilibre entre offre et demande de travail et de service, chaque acteur cherchant à maximiser l'utilité de sa localisation en termes de frais de transport et de loyer. En fait, TRANUS modélise les choix des différents catégories d'acteurs à l'aide de modèles de fonction d'utilité aléatoire (random utility), c'est-à-dire qu'au lieu de générer un seul choix en fonction des utilités des différentes alternatives – comme dans le cas d'un modèle de décision individuel- il calcule une distribution de probabilités sur ces alternatives, distribution qui va servir à répartir la population du groupe

entre elles. La forme de ces fonctions est toujours la « logit multinomiale³⁹ » qui permet le calcul d'une utilité moyenne (en prenant le logarithme de son espérance mathématique) appelé aussi « coût composite ». Une propriété intéressante du modèle multinomial logit est le fait que la différence de coût composite entre deux scénarios différents est égale au surplus du consommateur de la théorie économique néo-classique, d'où son utilisation intensive pour comparer les différents scénarios en termes de bien-être collectif.

Les principales variables sont :

1. La **production exogène**. Il s'agit d'une production qui ne répond pas à une demande des autres secteurs internes. Elle correspond à l'équivalent du vecteur de demande finale dans un modèle input-output classique. La croissance de la production exogène d'une période à l'autre est attribuée à chaque zone en fonction de son attractivité spécifique pour cette production.
2. La **production induite**. C'est la production générée par les demandes internes ou externes et elle dépend donc de celles-ci. Elle est allouée aux différentes zones par le modèle de distribution spatial et sectoriel.
3. La **demande exogène**. Il s'agit de la demande additionnelle à la demande endogène. Il ne s'agit pas de la demande en provenance du « reste du monde » qui correspond aux exportations mais d'une demande interne (localisée dans le périmètre géographique du modèle) mais exogène et obéissant à une évolution qui n'est pas générée par le modèle.
4. La **demande induite**. C'est la demande déterminée par les besoins de consommation (finale et intermédiaire) des secteurs orientés vers la consommation finale des ménages et des administrations.
5. Les **exportations**. Cf. point 3.
6. Les **importations**. Part de la demande interne satisfaite par une production externe. Elles résultent d'une compétition avec la production interne.
7. La **capacité de production**. Il s'agit de la production totale (exogène + induite) d'un secteur dans une zone. Elle peut se voir fixer un maximum, un minimum ou les deux.
8. Le **coût de consommation**. Il s'agit du coût (CAF) d'une unité de consommation pour une zone de consommation donnée. Il correspond donc au coût de production (dans sa zone de production) plus le coût du transport jusqu'à la zone de consommation. Dès lors que la consommation dans une zone donnée peut être satisfaite par la production de zones différentes avec des coûts de transports différents, il s'agit d'une moyenne pondérée.
9. Le **coût de production**. C'est le coût (FOB) unitaire de la production. Il correspond à la somme des coûts de consommation de toutes les consommations intermédiaires plus la valeur ajoutée.
10. Le **prix d'équilibre**. C'est la valeur d'une unité produite par un secteur donné dans une zone donnée lorsque la production est contrainte. En l'absence de contraintes sur la

³⁹ Les choix possibles étant de type catégorique et généralement supérieurs à 2 le modèle multinomial logit s'impose évidemment.

production, il est égal au coût de production. Si la demande excède la capacité de production, il est supérieur à ce coût et constitue une rente. Si, au contraire, la demande tombe en dessous d'un certain seuil, le prix d'équilibre devient inférieur au coût de production, entraînant une perte pour le producteur.

11. La **valeur ajoutée**. C'est la valeur en capital et en travail ajoutée à tous les coûts de consommation des consommations intermédiaires pour obtenir la production d'une unité donnée d'un bien ou service. Elle inclut la rémunération du capital (dividendes), du travail (salaires, charges sociales) plus les charges d'intérêt, les taxes etc.

Etapes du calcul

Etant donné une demande finale (exogène et endogène) dans tels et tels secteurs et zones, le modèle calcule la production induite correspondante. En principe, chaque secteur a besoin d'inputs en provenance d'autres secteurs ; une partie de la production totale est donc affectée à la consommation intermédiaire, le reste allant directement à la consommation finale, interne ou externe (exportations). Celle-ci est alors allouée aux différentes zones par des fonctions de distribution spatiale. Cette production, en retour, induit une demande de consommations intermédiaires, qui doivent également être spatialement allouées, et ainsi de suite jusqu'à l'équilibre.

Les étapes sont donc les suivantes :

1. Incrémentation et allocation spatiale des variables exogènes ;
2. calcul des attracteurs en vue du calcul de la production induite ;
3. estimation de la demande induite ;
4. estimation des coûts de production ;
5. allocation spatiale de la production induite en fonction des attracteurs ;
6. calcul des coûts de consommation et des désutilités ;
7. tests des contraintes et ajustement des prix d'équilibre
8. Si pas de convergence, retour à la phase 3.

a) Incrémentation des variables exogènes

Les variables exogènes sont : la production exogène, la consommation exogène, les restrictions sur les capacités de production, les exportations, les importations et les attracteurs initiaux (qui ensuite sont endogénéisés).

La formule utilisée pour la production exogène est la suivante :

$$X_i^{*n,t} = X_i^{*n,t-1} + \Delta X_i^{*n,t} \rho_i^{n,t} + \Delta X_i^{*n,t}$$

où :

$$X_i^{*n,t} = \text{la production exogène du secteur } n \text{ dans la zone } i \text{ au temps } t ;$$

$X_i^{*n,t-1}$ = la production exogène du secteur n dans la zone i au temps t – 1 ;

$\Delta X^{*n,t}$ = la croissance globale du secteur n entre t-1 et t ;

ρ_i^{nt} = la part de la croissance globale du secteur n « attribuée » à la zone i ;

$\Delta X_i^{*n,t}$ = un incrément « autonome » de production n attribuée à i (par le modélisateur).

La variable importante est celle qui attribue à chaque zone une part de la croissance de la production exogène. Celle-ci correspond à l'attractivité relative de la zone par rapport aux autres, comme le montre l'expression suivante :

$$\rho_i^{n,t} = \frac{A_i^{n,t}}{\sum_i A_i^{n,t}}$$

A_i^{nt} est l'attracteur du secteur n pour la zone i et la période t. Il ne s'agit donc pas d'une constante mais d'une variable qui se calcule par la formule :

$$A_i^{n,t} = \left(\sum_k b_k^n (X_i^{*k,t-1} + X_i^{k,t-1}) \right) W_i^{n,t}$$

dans laquelle on a :

$X_i^{*k,t-1}$ = la production exogène du secteur k dans la zone i à t-1 ;

$X_i^{k,t-1}$ = la production induite du secteur k dans la zone i à t-1 ;

b_k^n = le poids relatif du secteur k comme attracteur du secteur n ;

$W_i^{n,t}$ = attracteur initial de la zone i prenant en compte des éléments non modélisés susceptibles d'influencer la localisation de n.

L'attractivité d'une zone pour un secteur donné est donc fonction de l'attractivité pour ce secteur des autres secteurs présents dans la zone et du niveau de production de ces mêmes secteurs.

b. Calcul de la demande

La demande pour chaque zone est calculée comme suit :

$$D_i^n = \sum_m D_i^{mn} + D_i^{*n}$$

où

D_i^n = demande totale pour n dans la zone i

D_i^{*n} = demande exogène for n dans la zone i.

et

$\sum_m D_i^{mn}$
= somme de la consommation de n par les m secteurs « endogènes »

Celle-ci est exprimée par la relation suivante :

$$D_i^{mn} = (X_i^{*m} + X_i^m) a_i^{mn} S_i^{mn}$$

où :

X_i^{*m} = la production exogène du secteur m localisée dans la zone i

X_i^m = la production induite du secteur m dans la zone i

a_i^{mn} = la quantité en provenance du secteur n requise pour une unité du secteur m dans la zone i

et

S_i^{mn} = la proportion de n réellement demandée par le secteur m de la zone i compte tenu des substitutions possibles entre n et les k-1 autres secteurs.

Cette variable est elle-même fonction de la « désutilité » relative de n pour m comparée à celle des autres secteurs (k) substitués possibles de n , exprimée sous forme multinomiale-logit, soit⁴⁰ :

$$S_i^{mn} = \frac{\exp(-\delta U_i^{mn})}{\sum_k \exp(-\delta U_i^{kn})}$$

Quant à la quantité requise de n pour le secteur m dans la zone i , elle est obtenue comme suit :

$$a_i^{mn} = \min^{mn} + (\max^{mn} - \min^{mn}) \cdot \exp(-\delta^{mn} U_i^n)$$

où :

\min^{mn} = minimum requis de n pour la production d'une unité de m ;

\max^{mn} = maximum de n nécessaire à la production de m ;

δ^{mn} = élasticité-prix de n pour m ;

U_i^n = utilité liée à la consommation de n dans la zone i .

c. Calcul des coûts de production

Les coûts de production correspondent aux coûts de consommation des inputs nécessaires à la production d'une unité de m dans la zone i , plus la valeur ajoutée, soit :

$$c_i^m = \left(\sum_n D_i^{mn} \tilde{c}_i^n \right) + VA_i^m \quad \text{où :}$$

\tilde{c}_i^n = le coût de consommation de n dans la zone i .

d) localisation de la production induite

Une fois calculée la production demandée par chaque zone, celle-ci doit être répartie entre elles. Si un secteur est non-transportable toute la production est locale à la zone où elle est demandée, sinon la demande est distribuée entre les différentes zones de production au moyen d'une fonction logit multinomiale dans laquelle l'utilité de chaque zone est donnée par :

⁴⁰ Il nous semble que la formule ci-dessous est erronée : l'exposant au dénominateur ne devrait-il pas être mk et non mn ?

$$U_{ij}^n = \lambda^n (p_j^n + h_j^n) + t_{ij}^n \text{ où :}$$

p_j^n est le prix du secteur n dans la zone j

h_j^n est le coût implicite du secteur n dans la zone j

t_{ij}^n est la désutilité de transport pour le secteur n de la zone de production j vers la zone de consommation i ;

λ^n est un paramètre qui pondère l'importance relative des prix par rapport à la désutilité du transport.

Le résultat est ensuite divisé par l'utilité de la meilleure option pour obtenir une utilité marginale, soit :

$$U_{ij}^{n*} = \frac{U_{ij}^n}{\min_j U_{ij}^n}$$

Ce sont les utilités marginales qui sont ensuite injectées dans un modèle logit multinomial pour estimer la probabilité que la production du secteur n demandé dans la zone i soit localisée dans cette même zone :

$$P_{ij}^n = \frac{A_j^n \cdot \exp(-\beta^n U_{ij}^{n*})}{\sum_j A_j^n \cdot \exp(-\beta^n U_{ij}^{n*})} \text{ et donc :}$$

$$X_{ij}^n = D_i^n P_{ij}^n \text{ où :}$$

X_{ij}^n = production de n localisée dans la zone j correspondant à une demande venant de i ;

A_j^n = attracteur de la production de n vers j ;

U_{ij}^n = utilité marginale de la localisation de n dans la zone j en vue de satisfaire la demande de la zone i ;

β^n = paramètre de dispersion du modèle logit multinomial.

Enfin, le total de la production induite allouée à une zone est obtenu par simple sommation :

$$X_j^n = \sum_i X_{ij}^n$$

e) Calcul des coûts de consommation

Une fois la demande assignée aux différentes zones de production, les coûts de consommation peuvent être calculés, c'est-à-dire le montant qu'un secteur m localisé dans la zone i doit payer pour la consommation d'une unité de n .

$$\bar{c}_i^n = \frac{\sum_j X_{ij}^n (p_j^n + tm_{ij}^n)}{\sum_j X_{ij}^n} \quad \text{où :}$$

X_{ij}^n = montant de la production du secteur n demandé en i et produite en j ;

p_j^n = prix d'une unité de n dans la zone de production j

tm_{ij}^n = coût monétaire du transport d'une unité de secteur n de la zone de production j vers la zone de consommation i .

6.3.1.1.2 Interface avec le système du transport

A la fin du processus de calcul des activités, le modèle connaît les matrices O-D (origine-destination) pour les différents flux matériels et non-matériels. Celles-ci déterminent une demande potentielle de transport. L'interface entre activité et transport implique la prise en compte de temporalités différentes entre la logique de la production économique et celle du transport. Ainsi, la temporalité économique est souvent annuelle (les matrices input-output sont généralement calculées sur une base annuelle en Unités monétaires/an ensuite transformées en tonnes/an) alors que celle du transport est quotidienne et s'exprime en tonnes/jour. Par ailleurs, les catégories utilisées dans l'analyse économique ne correspondent pas non plus à celles utilisées dans le transport. Alors que dans le premier cas, on parlera de secteurs (agricole, minier, des services marchands, ...), dans le second on parlera en termes de containers, de camions-frigos, etc. Il faut transformer ces catégories et ces échelles les unes dans les autres. Ces transformations s'effectuent dans les deux sens puisqu'il existe des feedbacks entre le système des transports et celui des activités, par le biais des coûts et des désutilités du transport.

6.3.1.1.3 Le système du transport

TRANUS tire parti de la similitude formelle entre la formation d'un équilibre par les prix dans les offres et demandes d'emplois, de terrains, de bâtiments, etc. et l'équilibre entre l'offre et la

demande de transport. De nombreuses équations ont la même forme fonctionnelle dans les deux systèmes. Par ailleurs, l'un comme l'autre peuvent être représentés au moyens de matrices input-output spatialisées pour l'un, et de matrices origine-destination pour l'autre. Enfin, les comportements des agents sont représentés dans les deux systèmes par les mêmes modèles de choix discret (logit multinomial). Il est à remarquer qu'il s'agit de matrices dynamiques. Les attracteurs d'activité de matrices input-output spatialisées, qui jouent ici un rôle équivalent aux coefficients techniques des matrices de Leontief, sont variables et non fixes.

Nous n'entrerons donc pas dans une description aussi détaillée de ce système que celle que nous avons proposée du système des activités. Nous nous contenterons d'exposer la logique générale du calcul et l'enchaînement des opérations qu'il implique. Une fois en possession des matrices O-D pour les différents secteurs (transportables) retenus, TRANUS commence par rechercher les chemins existants entre les différents points origine et les points destination pour chaque mode de transport. Chacun des modes peut, à son tour, être subdivisé en opérateurs différents. Par exemple, on peut distinguer les modes suivants : cargo, transport public passagers, transport privé passagers. Le mode transport public passagers peut se subdiviser en bus, métros et trains de voyageurs. Le cargo peut comprendre les catégories : poids lourds, camionnettes, trains de marchandise, etc. Tout le réseau de transport est représenté dans TRANUS par un graphe constitué d'arcs orientés dont les attributs sont : type, longueur, capacité. A chaque type correspondent des caractéristiques communes en termes de vitesse, tarifs, coûts de maintenance.

Ici encore, le modèle cherche un équilibre entre offre et demande de transport et procède selon la même logique que celle qui préside à la modélisation des localisations des activités. La première étape consiste donc à identifier tous les chemins possibles entre origine et destination pour chaque flux de transport. Ensuite la démarche devient itérative et boucle sur les quatre étapes classiques des modèles de transport : la génération des mouvements (combien de mouvements ?), leur distribution (quelles origines, quelles destinations ?), leur répartition selon le mode (automobiles, chemin de fer, vélo ?), leur affectation dans le temps et l'espace (quels réseaux ? Quel opérateur ? Quelles routes ? A quel moment de la journée ?):

- On commence par calculer les coûts monétaires et généralisés (désutilités :délais, encombrements, confort, fiabilité...) pour chaque chemin. Seules les désutilités sont susceptibles de modifications au cours du processus itératif, en fonction notamment de la surcharge éventuelle du réseau qui peut allonger les temps d'attente et la vitesse de déplacement en cas de congestion, par exemple.
- Commence alors le deuxième stade, la génération des mouvements à différents moments de la journée selon leur nature, leur origine et leur destination⁴¹,
- L'affectation de chacun de ces mouvements à un mode de transport selon leur type, leur longueur, etc. Le choix du mode de transport pour les différents usagers (en fait une distribution de probabilité pour les différents modes possibles) est représenté par une fonction logit multinomiale dont l'argument est le coût composite (coût financier, durée et confort) du mode.
- Une fois estimés les origines et les destinations ainsi que les modes, le modèle attribue les différents mouvements aux différents itinéraires possibles entre chaque point origine et chaque point destination. Généralement, l'algorithme consiste à chercher le trajet le plus court pour chaque trajet. A ce stade, le modèle peut faire apparaître des problèmes de

⁴¹ C'est ici que les modèles gravitationnels et les matrices O-D entrent en jeu.

congestion si les capacités du réseau sont dépassées. Ceux-ci se traduisent par une augmentation de la durée et donc du coût du trajet pour les usagers ce qui induit un changement dans les paramètres de la fonction de choix et nécessite une ré-estimation des décisions en matière de mode de transport et d'itinéraire.

6.3.1.1.4 Evaluation en termes de développement durable

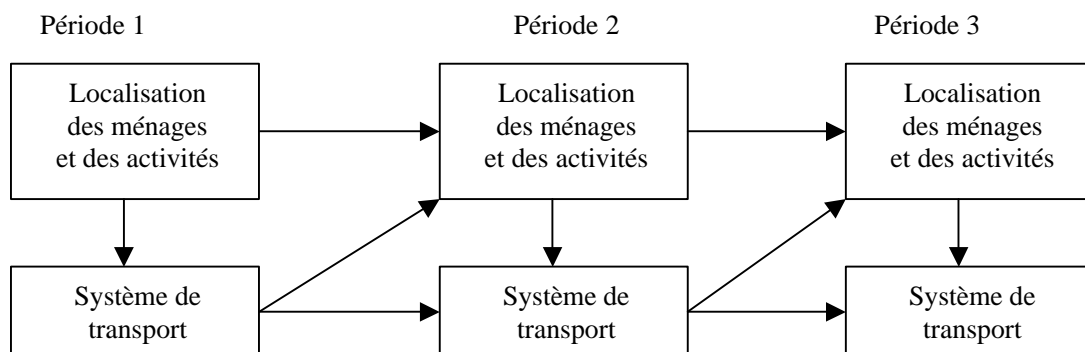
a) *l'interdisciplinarité*

Le caractère interdisciplinaire de TRANUS peut s'apprécier sur base de différents critères. Si le critère est celui du langage, TRANUS apparaît essentiellement mono-disciplinaire. Les concepts relèvent exclusivement de l'économie (coûts, utilité, production, consommation, etc.) si l'on fait exception de quelques notions techniques relatives aux réseaux de communication (chemins, nœuds, réseau, modes...). Les équations comportementales qui induisent la dynamique du système des activités adoptent des postulats et des hypothèses qui relèvent clairement de l'*homo oeconomicus*. Quant à la représentation du système des transports, elle s'inscrit clairement dans un champ disciplinaire spécialisé de l'économie, l'économie des transports.

Si l'on prend comme critère le dialogue interdisciplinaire pour construire les applications, définir et analyser des scénarios, ici encore TRANUS apparaît comme essentiellement mono-disciplinaire ou bi-disciplinaire si l'on convient de considérer l'économie des transports comme une discipline à part entière. Il n'y a, en effet, de dialogue qu'entre économistes et spécialistes des transports. Nulle place ne semble prévue pour l'écologiste, le sociologue, l'épidémiologue, le psychologue, l'architecte. D'ailleurs, les différentes problématiques identifiées dans le chapitre IV semblent absentes des préoccupations des auteurs et des utilisateurs de TRANUS, à l'exception de la mobilité, bien entendu et, dans une moindre mesure, de l'énergie. L'eau, la biodiversité, la distribution socio-spatiale de la pauvreté et l'exclusion, la santé, la sécurité, les aménités paysagères sont absents.

En prenant pour critère d'interdisciplinarité, l'existence de feedbacks entre variables relevant de disciplines différentes, TRANUS apparaîtra interdisciplinaire ou non, ici encore, selon que l'on considère l'économie des transports comme une discipline autonome ou pas. Cependant, même dans ce cas, il s'agirait alors au mieux d'une « bi-disciplinarité ». En effet, les décisions de localisation (des activités, des ménages, des services, etc.) sont influencées par l'offre en matière de transport et influencent les performances des opérateurs des réseaux qui, à terme, induisent des aménagements dans les infrastructures et l'offre de transport. On a donc bien affaire à un va-et-vient entre deux systèmes en interaction. L'énergie peut trouver sa place dans ce schéma en influençant le coût relatif du transport, ce qui se répercute alors sur les décisions de localisation. Le schéma ci-dessous rend compte de ces feedbacks.

Schéma 4 Feedbacks entre systèmes de l'occupation du sol et du transport



Cependant, TRANUS pourrait, nous semble-t-il, s'ouvrir à une interdisciplinarité plus complète qui s'articulerait autour de deux éléments du modèle : les fonctions de choix discret, d'une part et les attracteurs, d'autre part. Les spécifications des modèles logits permettent théoriquement la prise en compte de variables non strictement économiques, même si la modèle sous-jacent reste celui du comportement rationnel maximisateur. Rien n'interdit de faire intervenir dans les

éléments déterministes de la fonction d'utilité (facteur U_i^n) des paramètres comme les aménités, la pollution, les nuisances.

Par ailleurs, dans l'équation qui détermine l'évolution des attracteurs, on a vu que le paramètre $W_i^{n,t}$ représentait l'attracteur initial prenant en compte des éléments non-modélisés. Ce paramètre pourrait être endogénéisé.

Plus généralement, on a vu aussi que la notion de « secteur » n'était guère restrictive et rien ne s'oppose donc à ce que dans certaines applications, elle recouvre des secteurs environnementaux comme l'eau ou l'air.

b) l'incertitude

L'incertitude ne semble pas constituer une préoccupation majeure pour les concepteurs et les utilisateurs de TRANUS. Cependant, TRANUS n'est pas un modèle strictement déterministe. En effet, on a vu l'usage intensif qui y est fait des fonctions de choix discret pour représenter les comportements des agents. Ce type de modèle consiste précisément à calculer les probabilités pour un agent de choisir chacune des alternatives qui se présentent à lui. C'est donc une distribution de probabilité complète que les modèles de choix discret sont en mesure de spécifier. De surcroît, les intervalles de confiance de chacune de ces probabilités sont donnés par les algorithmes d'estimation. Rien ne s'oppose donc à une prise en compte satisfaisante des incertitudes liées aux données (base empirique du modèle et valeur des paramètres). Celle-ci est d'autant plus indispensable que TRANUS, comme d'ailleurs tous les modèles interactifs d'usage du sol et de transport, est gourmand en données nécessaires à son initialisation.

c) Le long terme et l'intergénérationnel

TRANUS semble moins apte à prendre en compte des évolutions séculaires. En général, les applications opérationnelles travaillent avec des intervalles de 5 ans et peuvent aller aussi loin dans le futur que le désire l'utilisateur. Cependant, la nature même du modèle, le fait surtout de s'inscrire dans une perspective d'équilibre sur les différents marchés, et l'usage qui est fait de matrices input-output, restreint la pertinence des résultats à un horizon temporel relativement court⁴². A cela s'ajoute le fait que TRANUS ne modélise pas explicitement le vieillissement de la population (pas davantage celui des entreprises ou des logements) ni le remplacement progressif des générations ce qui le handicape sans aucun doute pour fournir les bases d'une évaluation en termes d'équité intergénérationnelle.

d) les interactions local-global

TRANUS est évidemment parfaitement adapté à une représentation des interactions local-local à l'intérieur de son périmètre de validité. Les interactions avec l'environnement global se font

⁴² Il est vrai que si les modèles permettaient vraiment de prévoir l'évolution d'une ville à l'horizon de 20 ans ou davantage, les modélisateurs et les planificateurs pourraient abandonner leur peu rémunératrice occupation pour s'adonner à celle, plus lucrative, de la spéculation immobilière.

par la prise en compte dans les différentes matrices du secteur « reste du monde ». Celui-ci est cependant totalement exogène et est imperméable aux influences pouvant venir de la zone géographique modélisée.

e) la participation des parties prenantes

TRANUS est un logiciel « user-oriented » capable de s'exécuter sur des machines peu coûteuses. Son interface-utilisateur permet une certaine interactivité avec les utilisateurs. De plus, il peut se coupler aisément avec un SIG (Système d'information géographique), ce qui permet de visualiser les conséquences pour le tissu urbain des différents scénarios projetés. En revanche, son « vocabulaire » (jargon ?) très technique et exclusivement économique, s'il constitue déjà un obstacle à son appropriation par des scientifiques d'autres disciplines le rend probablement incompréhensible à des non-spécialistes.

Les limites des modèles basés sur la théorie économique de l'espace tels que TRANUS et MEPLAN lorsqu'il s'agit d'appréhender la problématique du développement durable, et notamment, du développement urbain soutenable n'ont pas échappé à leurs concepteurs ni sans doute à leurs utilisateurs. C'est la raison pour laquelle deux projets d'adaptation de ces modèles aux exigences du développement durable ont déjà vu le jour, tous deux financés par l'Union européenne. Il s'agit des projets SPARTACUS et PROPOLIS. Il n'est pas inintéressant pour notre propos de dire quelques mots sur leurs objectifs précis et les options retenues pour les atteindre.

6.3.1.2 PROPOLIS

Le projet PROPOLIS est un projet financé par la commission européenne en vue de se doter d'outils permettant d'appréhender le caractère durable ou non du développement urbain. Il fait suite à un précédent projet, intitulé SPARTACUS (System for Planning and Research in Towns and Cities for Urban Sustainability) qui s'est déroulé entre 1996 à 1998. Les objectifs de SPARTACUS étaient multiples :

- concevoir un système permettant d'analyser et de prévoir les interactions entre le transport, l'occupation du sol, l'environnement et les facteurs sociaux ;
- définir des stratégies de durabilité urbaine basées sur une combinaison d'instruments relatifs au transport, à l'aménagement du territoire et à l'environnement
- simuler et évaluer les effets à long terme que pourraient entraîner l'adoption de ces stratégies dans chacune des villes-pilotes du projet (Helsinki, Naples, Bilbao) ;
- définir un tronc commun de politiques socialement, économiquement et environnementalement fondées et viables qui pourraient être adoptées par les différents types de villes existant dans l'UE ;

La démarche suivie a consisté à développer un ensemble d'outils autour du logiciel MEPLAN. Adjonction de modules pour l'analyse des impacts environnementaux (qualité de l'air, nuisances sonores, émissions de GES), la visualisation graphique (notamment des impacts environnementaux) et l'interfaçage avec les utilisateurs. Fondamentalement, la durabilité y est appréhendée par le biais d'indicateurs sélectionnés pour être sensibles aux politiques urbaines, indépendants les uns des autres et prévisibles. Les indicateurs retenus étaient classés selon leur nature : économique, sociale et environnementale. PROPOLIS constitue un approfondissement de l'analyse et une amélioration des outils. La liste retenue est présentée ci-dessous.

Table 1. PROPOLIS Indicator System

Component	Theme	Indicator
Environmental indicators	Global climate change	Greenhouse gases from transport
	Air pollution	Acidifying gases from transport
		Volatile organic compounds from transport
	Consumption of natural resources	Consumption of mineral oil products, transport
		Land coverage
		Need for additional new construction
	Environmental quality	Fragmentation of open space
		Quality of open space
Social indicators	Health	Exposure to PM from transport in the living environment
		Exposure to NO ₂ from transport in the living environment
		Exposure to traffic noise
		Traffic deaths
		Traffic injuries
	Equity	Justice of distribution of economic benefits
		Justice of exposure to PM
		Justice of exposure to NO ₂
		Justice of exposure to noise
		Segregation
	Opportunities	Housing standard
		Vitality of city centre
		Vitality of surrounding region
		Productivity gain from land use
	Accessibility and traffic	Total time spent in traffic
		Level of service of public transport and slow modes
		Accessibility to city centre
		Accessibility to services
		Accessibility to open space
	Economic indicators	Total net benefit from transport
Transport user benefits		
Transport operator benefits		
Government benefits from transport		
Transport external accident costs		
Transport external emissions costs		
Transport external greenhouse gases costs		
Transport external noise costs		

Selon les participants au projet, PROPOLIS serait une des premières tentatives pour aborder le problème du développement urbain durable à partir d'un modèle des interactions entre le système urbain et l'environnement :

“The PROPOLIS system is one of the first attempts to address in a comprehensive modeling and evaluation framework the important question of urban sustainability and to assess the options for moving away from unsustainable urban development paths. In methodological terms the system developed moves ahead from traditional land use transport modelling by introducing also a number of interactions between the environment, land use and transport. In this way, it is

one of the first comprehensive land use transport environmental modelling systems (LTE models) operational” (Lautso et al., 2002, p.16).

Cependant, il reconnaissent eux-mêmes que les interactions s’effectuent à sens unique et qu’aucun feedback n’est pris en compte entre l’environnement et le système :

« However, it has the interaction with the environment implemented so far is (sic) a one-way interaction and the planned feedback from environment to land use and transport (Spiekermann and Wegener, 2002), i.e. the way by which changes in the environmental quality of urban locations affect location decisions of investors, firms and households and so indirectly also activity and mobility patterns, has to be postponed to a later stage of development.” (Lautso et al. 2002, p.16).

6.3.1.3 UrbanSim

UrbanSim est également un modèle de type LUTM qui présente certaines analogies avec MEPLAN, TRANUS, IRPUD, etc. et s’en distingue essentiellement par une approche moins agrégative et aussi moins déterministe. D’emblée, UrbanSim s’est appuyé sur les recommandations issues de la conférence de 1995 du TMIP (Travel model improvement project), à savoir :

- adopter le plus rapidement possible le modèle d’utilité aléatoire (Random utility model) ;
- s’appuyer sur des bases comportementales claires décrivant les principaux acteurs du développement urbain et les choix qui s’offrent à eux ;
- insister sur l’utilité des modèles pour l’analyse, la conception et le test de sensibilité des politiques urbaines ;
- prendre acte des temporalités différentes et de la pluralité des échelles géographiques en jeu dans le développement urbain⁴³ ;
- évoluer vers des modèles plus désagrégés ;
- impliquer plusieurs disciplines scientifiques⁴⁴ ;
- adopter une approche modulaire ;
- faire usage des SIG et des images satellitaires ;
- tester les effets du transport sur l’occupation de l’espace.

Pour respecter ce cahier des charges, UrbanSim a du finalement se démarquer nettement des autres grands modèles LUTM tels que TRANUS, MEPLAN, DRAM/EMPAL, etc. Par rapport à TRANUS, les différences portent essentiellement sur le niveau d’agrégation (beaucoup plus fin dans UrbanSim), l’absence d’hypothèse d’équilibre sur les différents marchés et l’adoption d’une approche dynamique. Alors que TRANUS est un modèle de statique comparative basée sur la notion d’un équilibre spatio-économique général, UrbanSim, en revanche, est un modèle

⁴³ Rappelons qu’il s’agit de deux des critères que nous mettons en avant pour l’appréhension du développement durable.

⁴⁴ Egalement un des critères que nous mettons en avant.

dynamique de déséquilibre. Par conséquent, là où TRANUS peut se contenter de données « cross-section » généralement relatives à une seule période d'observation, UrbanSim nécessite des séries chronologiques. Enfin, différence appréciable en termes d'accessibilité, alors que TRANUS est un produit commercial, UrbanSim est développé sous licence « open source », ce qui signifie que non seulement son usage est libre de tous droits mais encore que son code source est accessible et modifiable par quiconque.

Du point de vue qui nous intéresse, le cœur d'UrbanSim est constitué d'une pluralité de modèles partiels, chacun d'entre eux représentant un type d'acteur (ménages, promoteurs immobiliers, entreprises...) et les objets sur lesquels il agit (bâtiments, logement, terrain à bâtir...).

Le tableau 1 ci-dessous, extrait du manuel de référence d'UrbanSim, détaille les acteurs pris en compte, les décisions qu'ils sont susceptibles de prendre et les facteurs qui affectent et /ou sont affectés par ces décisions. Ainsi, les ménages peuvent-ils décider de migrer ou non, choisissent leur lieu de résidence, d'être locataire ou propriétaire, etc.

TABLE 1.
Decision-makers and Choices Affecting Urban Development

Decision-makers	Choices/Actions	
<i>Market Decisions (Endogenous)</i>		
Household	<i>Mobility (move or stay)</i> <i>Location (where to move)</i> <i>Housing Type (single/multi)</i>	<i>Housing Tenure (rent/own)</i> <i>Housing Price</i> <i>Auto Ownership</i>
Worker	<i>Labor Force Participation</i> <i>Job Change</i> <i>Full-time/Part-time</i> <i>Multiple Jobs</i>	<i>Workplace Choice</i> <i>Wage to Accept</i> <i>Mode of Transport to Work</i> <i>Trip Linking</i>
Business	<i>Number of Employees</i> <i>Wages to Offer</i> <i>Type of Space (office, retail, etc.)</i> <i>Tenure (rent/own)</i>	<i>Lease/Purchase Cost (willingness to pay)</i> <i>Mobility (move or stay)</i> <i>Location (where to move)</i>
Developer	<i>Land Purchase</i> <i>Infrastructure Investment</i> <i>New Development</i>	<i>Redevelopment</i> <i>Land Use</i> <i>Density</i>
<i>Public Policy Decisions (Exogenous)</i>		
Municipality	<i>Tax Rate</i> <i>Tax Abatement/Incentives</i> <i>Zoning</i> <i>Land Use Plan</i> <i>Urban Design</i>	<i>Development Fees</i> <i>Amenities (Parks)</i> <i>Services (Fire, Police)</i> <i>Infrastructure (Transportation, Water, Sewer)</i>
Transit Agency	<i>Transit Infrastructure</i>	<i>Levels of Service</i> <i>Transit Fares</i>
Lender	<i>Loans for Mortgages</i>	<i>Development Loans</i> <i>Interest Rates</i>
School District	<i>Tax Rates</i>	<i>School Quality</i>
Other Local, State, Federal Agencies	<i>Fees, Regulations governing land use, transportation, environment</i>	<i>Highway, Rail, Ports, Airports</i>

On ne sera pas surpris, à la lecture de ce tableau, de constater que les décisions des pouvoirs publics sont un élément exogène au modèle. Du reste, dans le schéma 2 ci-dessous, qui présente sous forme de diagramme « entités-relations » les agents qu'UrbanSim prend déjà en compte et ceux qu'il se propose de prendre en compte dans ses futures évolutions, on constate que le pouvoir local est inclus comme auteur de politiques qui réglementent l'accès et l'usage du sol, comme bâtisseur d'infrastructures et comme fournisseur de services publics. Mais toutes les

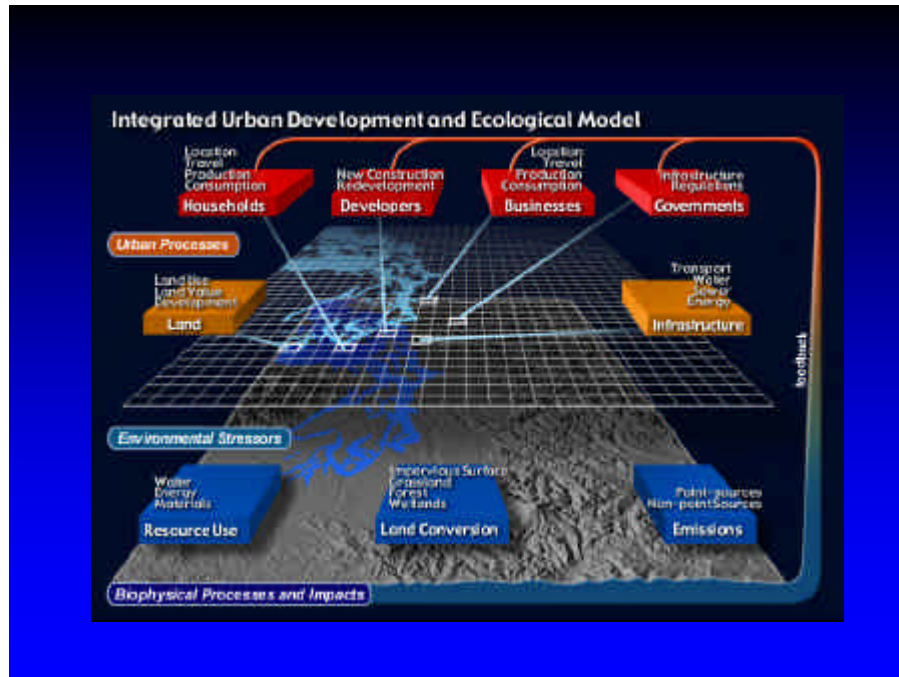
flèches qui le concernent partent de lui, aucune n'aboutit à lui. Ce qui signifie qu'il n'est lui-même soumis à aucune influence de la part des autres objets ou acteurs du modèle et que son comportement reste donc exogène à celui-ci. Ouvrons une parenthèse à ce sujet : à notre connaissance, aucun outil ne tente de rendre les décisions publiques endogènes. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'ils ont précisément pour objet l'aide à la décision politique et que la possibilité pour les pouvoirs publics d'agir « librement » sur le système urbain suppose une position d'extériorité par rapport à lui. Il ne serait pourtant pas inintéressant dans une perspective scientifique ou de prise de décision collective impliquant non seulement les pouvoirs publics mais la société civile, d'imaginer représenter les autorités locales comme des acteurs parmi d'autres du système, ayant leurs propres contraintes, mais aussi leurs aspirations et leur grille de perception. Il est en tout cas évident, *a priori*, que celles-ci font partie du système et que leur comportement constitue autant une réponse (une adaptation, si l'on préfère) à ce qu'il s'y passe qu'une manifestation de pleine et entière souveraineté. Essayer d'endogénéiser l'acteur public supposerait évidemment que l'on s'interroge sur le répertoire comportemental qui lui est accessible et sur la part de libre choix et de réponse contrainte dans les décisions qu'il peut être amené à prendre ou ne pas prendre. Plus généralement, inclure les autorités locales comme un acteur parmi les autres du développement local revient à tenter de rendre compte et donc expliquer de l'intérieur même du système les décisions collectives susceptibles de l'affecter. Après tout, le système politique n'est-il pas une composante parmi d'autres du système local ou urbain ? Il nous semble, à première vue en tout cas, que l'approche en termes de multi-agents devrait se prêter plus facilement qu'une autre à cette représentation endogène de la décision politique.

Ce qui est également intéressant dans le schéma 2, c'est l'incorporation de nouveaux objets absents de la Table 1 : les ressources consommées et les émissions produites par les ménages et les entreprises. En revanche, il ne semble y avoir aucune relation entre ces dernières et le sol. L'eau et l'énergie consommées ainsi que les pollutions et déchets produits semblent déconnectés de leur support physique, l'espace. Peut-être ne faut-il pas tirer des conclusions hâtives de ce qui peut n'être que le souci de ne pas encombrer exagérément le diagramme afin de préserver sa lisibilité ? Ce qui est, en revanche, indéniable, c'est la volonté dont témoignent les articles de P.Waddell et de M.Alberti d'intégrer dans un même modèle la croissance urbaine et le système écologique. Ainsi, peut-on lire dans (Alberti et Waddell, 2000): « One of the greatest challenges for natural and social scientists in the next decades is to understand how metropolitan areas evolve through the interactions between human behaviors and bio-physical processes. The complexity of these interactions is extraordinary. However, our failure to understand and to account adequately for them in policy decision has historically yielded infrastructure investment and land use decisions with unintended long-term effects »

C'est pourquoi UrbanSim est en train d'évoluer⁴⁵ dans une direction qui le rapproche de plus en plus des modèles de type multi-agents et l'éloigne de plus en plus des modèles LUTM classiques.

⁴⁵ A tout le moins pour ce qui concerne son rôle dans le projet PRISM (Puget Sound Regional Integrated Simulation Model).

Schéma 5 Liens entre agents, espace et environnement dans UrbanSim



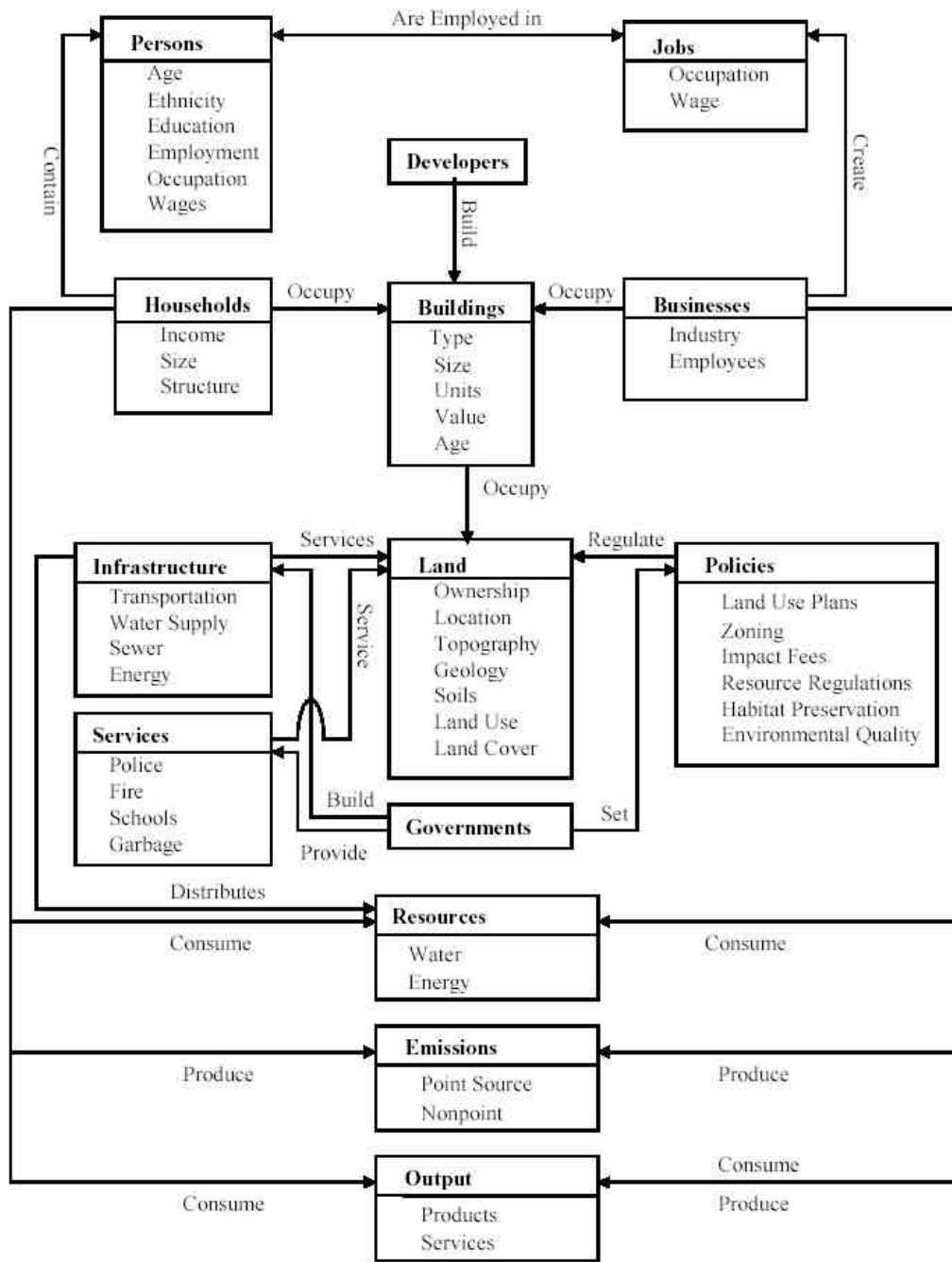
D'une part, parce que les comportements des ménages, des entreprises et des promoteurs, font désormais l'objet d'une véritable micro-simulation, d'autre part parce que l'environnement et les changements qui l'affectent rétroagit sur les préférences et les décisions des agents. Il y a donc désormais des feedbacks entre l'environnement et le système « humain » et donc une authentique interdisciplinarité. Ceci suppose de travailler à une échelle géographique beaucoup plus fine qu'auparavant. Effectivement, le niveau de granularité adopté est celui du bâtiment ou de la parcelle et non plus de la zone, comme précédemment.

Les productions et consommations intermédiaires des entreprises sont modélisées par une combinaison de micro-simulation et d'approche input-output. La matrice input-output, qui représente les flux entre secteurs économiques au niveau agrégé est redistribuée entre unités individuelles localisées spatialement en fonction de leur taille et de leur secteur d'activité. Les changements dans l'usage du sol (qu'il s'agisse de nouvelles constructions ou de rénovations) sont le fait de promoteurs qui réagissent aux hausses des prix des loyers consécutives aux déséquilibres du marché immobilier. La simulation se fait au niveau de la parcelle et tient compte des contraintes légales ainsi que géographiques qui déterminent son usage possible. Ces contraintes ou, au contraire, les atouts dont elle dispose, déterminent les profits attendus d'investissements dont elles pourraient faire l'objet. *In fine*, les investissements les plus rentables sont effectués conduisant à l'érection de nouveaux bâtiments sur les parcelles encore libres. A noter qu'un des éléments qui intervient dans le calcul de la rentabilité est le développement ou l'état des parcelles avoisinantes.

La nouveauté principale consiste ensuite à faire en sorte que ces changements dans l'usage du sol soient intégrés dans des modèles bio-physiques de l'atmosphère, de l'eau, et des écosystèmes terrestres et aquatiques, notamment en relation avec les émissions de polluants et de nutriments (phosphores et nitrates). En retour, la qualité de l'environnement doit être prise en compte dans les décisions des ménages, des entreprises et des promoteurs. Les auteurs parlent à ce propos de feedbacks entre la dynamique (essentiellement anthropique mais pas

seulement) du « land use » et celle (essentiellement écologique, mais pas uniquement) du « land cover ». En fait, les processus bio-physiques et écologiques ne feront pas partie d'UrbanSim proprement dit mais seront modélisés au moyen d'un autre logiciel, en l'occurrence GEM. A noter que si l'occupation du sol est représentée au niveau de la parcelle cadastrale, la dynamique du « land cover » se situe à une échelle différente (« patch »). Le schéma ci-dessous explicite les liens entre les diverses entités représentées.

Schéma 6 Diagramme 'entités -relations' d'UrbanSim



6.3.1.4 Conclusion

Le projet PROPOLIS et l'évolution d'UrbanSim témoignent d'une prise de conscience croissante de la nécessité d'ouvrir les modèles LUTM à l'environnement et plus généralement au développement durable. La voie suivie dans PROPOLIS consiste à connecter MEPLAN à des modules externes chargés de prendre en compte les fonctionnalités absentes dans ce dernier : impacts environnementaux, visualisation des effets, construction et évaluation de scénarios. Il n'y a guère de doute que ces aménagements sont de nature à améliorer ses performances en termes d'intégration des parties prenantes et d'évaluation de certains impacts globaux des politiques urbaines (changement climatique). En revanche, on a vu que ceux-ci ne débouchaient pas sur une véritable interdisciplinarité, du fait de l'absence de feedbacks de l'environnement vers le système urbain. Par ailleurs, l'ajout de modules extérieurs ne change évidemment rien aux options fondamentales du modèle qui peuvent le handicaper quelque peu pour réaliser une prise en compte véritablement satisfaisante du développement durable : absence de réelle dynamique, granularité trop élevée, fondement trop strictement économique, etc.

Les évolutions d'UrbanSim pour répondre à ce cahier de charges semblent plus convaincantes principalement parce qu'elles visent une véritable interdisciplinarité fondées sur l'interaction de dynamiques à la fois naturelles et humaines. Ceci est facilité par une conception de l'espace comme quelque chose de plus que le support des activités humaines, c'est-à-dire comme le résultat et en même temps le point de départ des processus socio-économiques et écologiques et de leur imbrication.

6.3.2 Les modèles de dynamique des systèmes

6.3.2.1 URBAN DYNAMICS

« Urban Dynamics » (UD) est totalement différent de modèles tels que MEPLAN ou TRANUS. Il s'agit d'un exercice déjà ancien, mené par J.Forrester non pas pour étudier telle ou telle ville en particulier mais pour mettre en évidence les potentialités de la dynamique des systèmes pour l'aide à la gestion des grandes villes américaines⁴⁶. La ville modélisée par Forrester est d'ailleurs une ville imaginaire qui ne correspond strictement à aucune ville en particulier mais présente, selon lui, les grandes caractéristiques communes à toutes. Le modèle a cependant été appliqué avec succès, semble-t-il, à des villes réelles comme Lowell (Mass.) et certaines villes françaises.

Il est important de noter que l'objectif de Forrester n'était pas de présenter une théorie générale de la croissance et du déclin des zones urbaines⁴⁷ mais de s'attaquer aux problèmes auxquels étaient alors confrontées les grandes agglomérations américaines, caractérisées par lui de « vieillissantes ». Forrester recommande d'ailleurs de modéliser le problème plutôt que le système, entendant par-là que la représentation du système considéré n'est valide que dans le cadre strict du problème à résoudre et que le traitement d'un autre problème relatif au même système exigerait une représentation différente de celui-ci.

⁴⁶ Nous ne rappellerons pas ici les caractéristiques essentielles de la dynamique des systèmes, celle-ci ayant été brièvement décrite dans le chapitre 2 du présent rapport.

⁴⁷ Forrester semble d'ailleurs ignorer l'ouvrage de J.Jacobs « The Death and Life of Great American Cities » paru en 1961 et qui fut un véritable « bestseller ».

« L'aire urbaine est représentée comme un système social inscrit dans un environnement avec lequel il communique. Les gens répartis en trois catégories – dirigeants, travailleurs, sous-employés- peuvent se mouvoir vers et hors de l'aire. Les flux d'entrées et de sorties de l'aire dépendent de son attractivité relative comparée à celle de son environnement. Les conditions dans l'environnement englobant sont prises comme une référence (qui peut être changeante) et l'attraction de l'aire croît et décroît par rapport à cette référence. L'attraction de l'aire, comparée à son environnement, dépend des conditions et des activités *intramuros*.... » (Forrester, 1979 [1969], 3).

La ville, selon Forrester, est donc le résultat de l'interaction, au sein d'un espace strictement limité et constant, de trois systèmes possédant chacun leur dynamique propre : la population (caractérisée par son rapport à l'emploi), les activités économiques et l'espace bâti. La population est désagrégée, de façon assez grossière d'ailleurs, par groupe d'âge et par statut socio-économique (trois classes). Le secteur économique est subdivisé en trois classes (entreprises nouvelles, mûres et en déclin). Quant aux logements, ils se composent de logements pour employés et cadres, pour ouvriers qualifiés et pour ouvriers non-qualifiés. Le passage d'un logement d'une classe supérieure vers la classe inférieure s'effectue simplement par vieillissement. Autrement dit, les logements pour ouvriers non-qualifiés d'aujourd'hui sont les logements pour ouvriers qualifiés d'hier.

Chaque classe sociale a son taux d'accroissement naturel et migratoire (mobilité sociale ascendante et descendante).

Les entreprises emploient en quantité variable un certain nombre de personnes relevant des trois catégories sociales. Le lien entre population et entreprises passe donc par l'équivalent d'une matrice d'emploi. Sa composition varie en fonction de l'âge de l'entreprise. Plus elle est jeune, plus la proportion de cadres et de travailleurs qualifiés est grande, et vice versa. Par ailleurs, une industrie jeune emploie un nombre absolu de personnes plus élevé qu'une industrie ancienne. Ceci ne peut manquer de surprendre dans la mesure où une entreprise récente devrait bénéficier des gains de productivité entraînés par le progrès technique et employer moins de main d'œuvre qu'une entreprise plus ancienne dans la même activité. Cependant, ce que Forrester entend par industrie correspond davantage à la notion de secteur économique qu'à celle d'entreprise. On peut, en effet, admettre qu'un secteur en croissance absorbe davantage de main d'œuvre qu'un secteur en déclin.

La dynamique de la croissance, de la stagnation et du déclin des villes est fondée sur la notion de vieillissement. C'est la naissance de nouvelles entreprises qui stimule la croissance urbaine, leur maturité puis leur vieillissement entraînant la décadence. Dans la phase de croissance, des emplois étant créés, une population active et donc jeune est attirée par la ville. Des logements sont construits pour l'accueillir. Puis, les industries comme les logements vieillissent. Des logements vétustes et une attractivité économique réduite repoussent une population aisée. Par contre, des logements moins chers attirent une population plus pauvre. Il en résulte une baisse des revenus des municipalités. Les interactions entre les trois sous-systèmes sont particulièrement claires dans la détermination de l'attractivité de l'aire considérée. Ainsi le coefficient d'attractivité (AMM) qui détermine (avec un certain délai, dit d'information, AMMPT) l'immigration de population sans qualification (UA) est déterminé par :

- la possibilité de promotion professionnelle de la population sans qualification vers des emplois d'ouvriers qualifiés (UAMM) ;
- la disponibilité de logements pour la population sans qualification (UHM) ;
- le niveau des dépenses publiques par habitant (indicateurs de services urbains)(PEM)

- le nombre d'emplois sans qualification rapporté au volume de la population des non-qualifiés (UJM) ;
- l'existence éventuelle d'un plan de construction de logements bon marché (UHPM) ;

$$\text{Avec } \text{AMM}_t = \text{UAMM}_t * \text{UHM}_t * \text{PEM}_t * \text{UJM}_t * \text{UHPM}_t$$

AMMt est ensuite transformé en AMMPT qui constitue une version retardée⁴⁸ de AMM pour rendre compte de délais entre la situation objective et la perception que l'on peut en avoir. Toutes les variables qui interviennent dans le calcul d'AMM dépendent elles-mêmes (de façon parfois non-linéaire) d'autres variables du modèle au même instant ou au moment et/ou de leurs propres valeurs précédentes.

6.3.2.2 *Evaluation en termes de développement durable*

Indépendamment des conditions examinées ci-dessous, il y a une caractéristique des modèles de type UD qui présente un intérêt particulier pour une approche en termes de développement durable. Cette caractéristique est la suivante : les systèmes représentés par la DS, et celui de la ville n'y fait pas exception, sont envisagés par rapport à une situation dans laquelle les relations entre les différentes variables s'établissent à un niveau jugé « normal ». Le modèle cherche ensuite à simuler, et donc expliciter, les écarts par rapport à cet équilibre, engendrés par le rôle de variables nommées « multiplicateurs », écarts qui sont sources ou synonymes de problèmes pour les gestionnaires et les décideurs. Ainsi, dans la représentation même de la structure du modèle, les relations entre variables sont modélisées comme des variations à la hausse ou à la baisse autour d'une valeur de référence (ou valeur normale) sous l'effet de ces multiplicateurs. Autrement dit, ce que représente le modèle, c'est la dynamique de l'écart par rapport à un état recherché, dynamique susceptible de conduire à la destruction du système (comportement explosif ou implosif).

Or, la situation « normale » ou recherchée pourrait correspondre assez étroitement à celle de « durabilité » assimilée, dans le cas du système urbain, au renouvellement optimal et harmonieux des populations, des industries et du logement soumis par ailleurs à un vieillissement inéluctable. On peut donc décrire l'approche de Forrester comme fondamentalement normative puisqu'elle se fonde sur une vision *a priori* de la durabilité en terme d'équilibre entre populations, logements et emplois. Il importe de préciser que cet *a priori* normatif n'est en rien consubstantiel à la méthodologie de la dynamique des systèmes et qu'il est parfaitement possible de construire des modèles de ce type qui en fassent l'économie. Néanmoins, on peut aussi juger intéressante et potentiellement féconde une modélisation qui, loin de représenter le réel dans son évolution spontanée quitte à se demander ensuite si celle-ci peut être qualifiée de durable, part au contraire d'emblée d'une définition de la soutenabilité pour étudier les mécanismes qui font que le système s'éloigne de cet état d'équilibre et tester les moyens susceptibles de l'y ramener.

Interdisciplinarité

Le modèle de dynamique urbaine est-il interdisciplinaire ? On aurait tendance à dire qu'il est plutôt « a-disciplinaire » ou éventuellement, « transdisciplinaire ». En réalité, le modèle est élaboré en dehors de toute référence explicite à une théorie disciplinaire⁴⁹ quelconque qu'elle

⁴⁸ « lagged » en anglais.

⁴⁹ Forrester, d'ailleurs, ne s'en cache pas.

soit économique, sociologique, géographique ou autre. L'évolution des activités ne correspond à aucune théorie économique identifiable, si ce n'est peut-être, selon la suggestion du préfacier de la traduction française de l'ouvrage, la biologie industrielle d'Alfred Marshall. On pourrait aussi y trouver en filigrane une vision cyclique de l'économie à la Kondratiev ou à la Juglar. Ce n'est sans doute pas un hasard, d'ailleurs, si les cycles de Kondratiev joueront un rôle important dans le modèle d'économie nationale des USA que cherchera à construire plus tard l'équipe de Forrester au MIT, sans grand succès d'ailleurs. Cependant, si on devait associer la logique du modèle à une discipline c'est probablement à la démographie qu'il faudrait songer. En effet, le mécanisme qui détermine fondamentalement l'évolution du système est celui de la naissance (ou de l'immigration), du vieillissement puis de la disparition de trois entités en interaction : les travailleurs, les activités et les logements. On pourrait donc qualifier la théorie sous-jacente au modèle de dynamique urbaine de « démographie généralisée » puisqu'elle déborde le seul domaine des populations humaines pour embrasser dans une même logique les secteurs et entreprises économiques et les logements.

Reste qu'un autre concept joue également un rôle fondamental dans le modèle : celui d'attractivité, concept que l'on retrouve également chez TRANUS. De quelle discipline ce concept relève-t-il ? La réponse est indéterminée car il s'agit au fond, d'un concept fourre-tout. C'est précisément ce que les différents modèles mettent dans l'attractivité qui révèle le caractère plus ou moins interdisciplinaire de l'approche.

Si l'interdisciplinarité réside dans les interactions dynamiques entre systèmes de nature différente, alors le programme de la DS est fondamentalement interdisciplinaire puisque, pour Forrester et la théorie des systèmes en général, c'est la présence de rétroactions entre sous-systèmes différents qui explique la dynamique d'un objet complexe au point que l'existence ou non d'interactions constitue le critère sur lequel Forrester s'appuie pour tracer la frontière entre un système et son environnement.

« Les relations de cause à effet entre environnement et système sont à sens unique, alors que les éléments internes sont structurés en boucles de rétroaction qui forcent ces éléments à interréagir. L'environnement peut affecter le système, mais le système n'affecte pas de façon significative l'environnement. Il n'y a aucune boucle essentielle ..qui part du système pour aller vers l'environnement et revenir au système.» (Forrester, 22).

A titre d'illustration, Forrester donne l'exemple de la mécanisation de l'agriculture. Celle-ci est certainement de nature à induire une pression sur les zones urbaines dans la mesure où elle libère de la main d'œuvre agricole. En revanche, la prolifération de taudis dans telle ou telle zone urbaine ne rejaillit en rien sur la mécanisation de l'agriculture. Celle-ci figurera donc à l'extérieur du système, dans son environnement

UD, on a pu s'en rendre compte, est extrêmement limité dans sa conception de l'espace et du système urbain. Aussi bien, ce n'est pas ce modèle en particulier qui nous retient ici mais le type de modèle que cette approche permet de construire. A cet égard, il nous semble que le potentiel interdisciplinaire de la DS reste considérable. Il n'y aurait guère de difficulté à intégrer dans un modèle du type UD un sous-système de l'eau, une désagrégation des zones selon leurs caractéristiques écologiques, un sous-système de l'air, etc. Certes on peut sans doute en dire autant de TRANUS, par exemple, mais il est clair que les potentialités de la DS sont à cet égard supérieures car, comme précisé ci-dessus, la notion même de clôture du système (distinction entre le système et son environnement) implique la prise en compte de relations en boucle entre les différents sous-systèmes du système total. Cela signifie que si l'on ajoute au modèle UD un sous-système de l'eau, par exemple, on est automatiquement conduit par la nature même de la méthode à représenter les interactions entre celui-ci et les logements, la population et les activités économiques et à s'interroger sur les actions en retour des uns sur les autres.

Prise en compte des incertitudes

UD comme tous les systèmes relevant de la DS est intrinsèquement et fondamentalement déterministe. Pour Forrester et ses épigones, ce n'est pas la valeur des données initiales ni celle des paramètres qui importe mais la structure même du modèle, c'est-à-dire la nature des interactions entre les variables d'état du système. Les praticiens de la méthode sont d'ailleurs, pour la plupart, assez sceptiques quant à l'apport réel des méthodes d'estimation statistique des paramètres. Du reste, l'accent placé sur la nature non-linéaire des relations entre variables au sein d'un système complexe rend inapplicables la plupart de ces techniques. Il faut bien constater que la pratique de tests de sensibilité de la robustesse du modèle aux conditions initiales et aux valeurs prises par les très nombreux « multiplicateurs » qui peuplent ces modèles est très rare. Il est vrai que, vu le nombre de constantes, multiplicateurs, délais etc. que charrie le moindre modèle de ce type, rend la tâche à peu près impraticable. Le déterminisme structurel de la dynamique des systèmes (le modèle se comporte comme sa structure le lui commande) n'implique en rien l'impuissance de l'action politique ou l'impossibilité de contrôler le système. Au contraire, on peut estimer que l'absence de recours systématique aux tests de sensibilité est, dans une certaine mesure, compensée par la variété des scénarios de politiques (au sens de *policy* en anglais ou de *beleid* en néerlandais) analysés. La part d'indétermination prise en compte par les modèles de DS se situe donc principalement dans les valeurs prises par les variables de contrôle, celles-là même qui peuvent être manipulées par le décideur et orienter la trajectoire du système. Cependant, ici encore, l'analyse des différents scénarios de contrôle du système conduit le plus souvent à mettre en évidence la résistance du réel aux manipulations « politiques » et donc la force du déterminisme que la plasticité des systèmes aux actions intentionnelles.

Temporalités multiples et prise en compte du long terme

UD est un modèle de très long terme : Forrester n'hésite pas à explorer le comportement du système pendant rien moins que 250 ans⁵⁰. Certes, on peut juger totalement irréaliste de prétendre pouvoir dire quoi que ce soit de pertinent sur un système humain à un horizon aussi lointain. Ce serait cependant se méprendre sur le rôle de ces explorations de long terme. Il ne s'agit pas tant de s'inquiéter de ce que sera réellement le système dans 250 ans que de s'assurer que celui-ci garde un comportement compréhensible (vraisemblable, réaliste) même au cours d'un laps de temps aussi long. Or, ceci n'a rien d'évident pour un grand nombre de modèles utilisés dans la prise de décision. La plupart des modèles économétriques ou d'équilibre général ne peuvent être simulés que sur des périodes très courtes sous peine de les voir adopter des comportements aberrants, certaines variables parfois essentielles prenant par exemple des valeurs invraisemblables si pas tout simplement impossibles (quantités négatives, par exemple). En étudiant le comportement du modèle sur une période aussi longue, on s'assure au moins de la robustesse de la représentation de la structure et de la dynamique du système réel. Ceci autorise dès lors le test de politiques sur des périodes assez longues et la prise en compte de l'équité intergénérationnelle.

⁵⁰ Pour être précis, le modèle simule le processus de croissance d'une ville à partir d'une situation initiale (t=0) caractérisée par l'absence de toute implantation humaine dans l'aire géographique considérée. L'état d'équilibre (équivalence des flux d'entrée et de sortie, de construction et de démolition) est atteint à t=200 (après une phase de croissance jusqu'à épuisement de l'espace disponible, puis de récession) et les simulations de mesures politiques vont de t=200 à t=250. A noter que l'état d'équilibre correspond à une situation vieillie : les logements et les entreprises sont vieilles

Local-global

Le critère retenu par Forrester pour opérer la séparation entre le système et son environnement est celui de l'absence de feedback du système vers l'environnement. Dès lors, il est exclu de prendre en compte une quelconque causalité hiérarchique entre niveaux. Celle-ci n'est pourtant pas hors de portée d'une approche en termes de DS. Il suffirait pour cela de décomposer l'environnement en autant de zones (une au minimum) que nécessaire et de les représenter explicitement. On se retrouverait alors avec un modèle matriciel, chaque équation étant indicée en fonction du nombre de zones retenues. Ceci serait évidemment insuffisant pour permettre la prise en compte de phénomènes authentiquement émergents mais permettrait à tout le moins de générer des effets d'agrégation susceptibles de se répercuter sur les entités composant le macro-système.

Participation des parties-prenantes

Comme on l'a noté ci-dessus, UD a été construit dans l'ignorance la plus totale de la littérature scientifique sur la ville ou l'économie régionale mais en étroite collaboration avec des responsables de grandes villes. Forrester s'en explique dans l'introduction :

« En m'attendant à ce que la source d'information la plus précieuse soit, non pas des documents, mais des personnes ayant une connaissance pratique des affaires urbaines.. » ou encore « Cet ouvrage est issu véritablement d'un corpus de connaissances différent. De la connaissance intime de ceux qui connaissent l'activité urbaine de première main... ». Dans une certaine mesure, les systèmes comme UD relèvent davantage d'une approche en terme de système expert que de la modélisation scientifique *stricto sensu*. L'adéquation par rapport au vécu des parties prenantes, à la vision des problèmes et des solutions est ici jugée plus importante que la conformité à des théories scientifiques. Reste que le point de vue des parties prenantes doit pouvoir se couler dans le moule de la formalisation en termes de DS. Ce ne semble guère être un problème car il paraît que ce cadre de référence est aisément accepté et paraît même assez naturel y compris aux non-initiés.

6.3.2.3 Ugrow

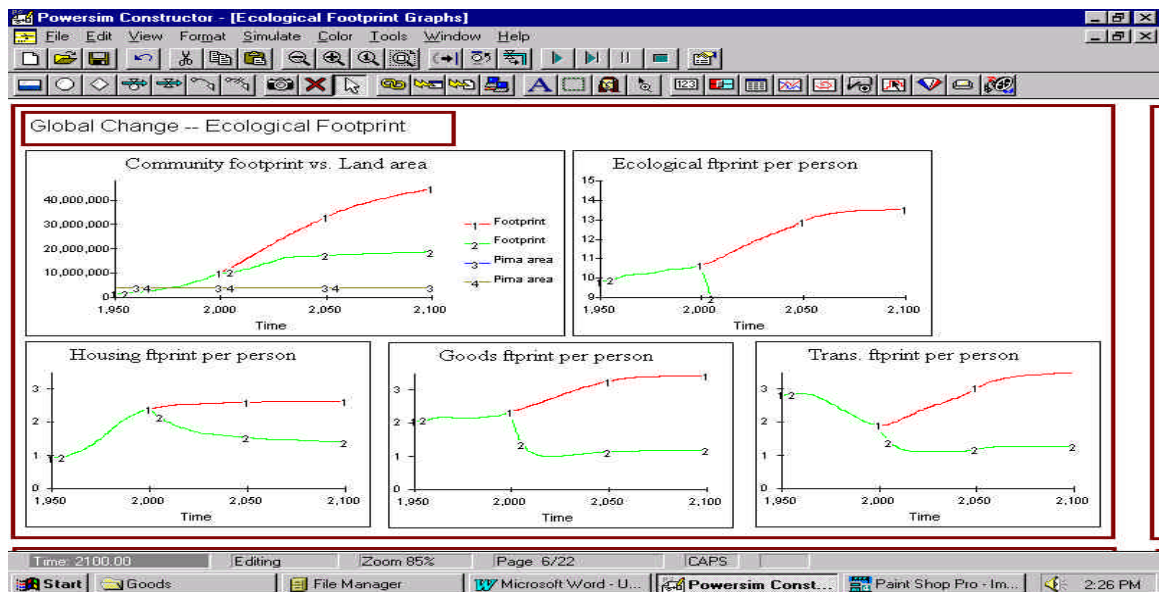
Urban Dynamics est un modèle « théorique » destiné essentiellement à démontrer l'utilité de l'approche. Immédiatement après sa publication, un certain nombre d'applications plus concrètes ont été réalisées, sans que l'approche trouve véritablement droit de cité comme outil d'aide à la prise de décision. Une des raisons de cette désaffection tient au manque de bases théoriques, en matière économique notamment, des modèles de DS. Une autre raison est l'absence de prise en compte explicite de l'espace et le manque de passerelles entre les modèles de DS et les données. Cependant, on assiste à un certain regain d'intérêt pour l'approche en termes de DS pour les problèmes d'aménagement du territoire notamment à cause de la prise en compte croissante de l'environnement dans les politiques de développement urbain et communautaire. Le modèle Ugrow, développé au Prescott College à Prescott, (USA) qui est sans doute l'application la plus récente et la plus aboutie de la logique de « Urban Dynamics » témoigne de ce regain d'intérêt. Ainsi, une des améliorations importantes de Ugrow par rapport à UD est le lien avec un SIG et un outil de visualisation 3D qui permet de visualiser les effets des politiques de développement urbain. Par ailleurs, Ugrow s'inscrit d'emblée dans une perspective de développement durable puisqu'il constitue une évolution d'un modèle primitif, appelé « Efoot » basé sur le calcul de l'empreinte écologique d'une ville ou région et sur l'évaluation de la durabilité des politiques urbaines en termes d'allègement ou au contraire d'aggravation de l'empreinte écologique.

Dans son état actuel, Ugrow est composé d'environ 300 équations représentant les interactions entre système économique, système socio-démographique et système environnemental. Les

domaines couverts sont : la qualité de la vie, l'activité économique et les entreprises, le logement, la démographie, l'usage du sol, le transport, l'énergie et le changement climatique (en fait, les émissions de CO₂).

Comme UD, Ugrow prend pour année d'initialisation une date déjà ancienne puisqu'il s'agit de 1950. On peut relever d'ailleurs cette particularité des modèles issus de la DS qui consiste à tenter de reproduire une importante part du passé des systèmes représentés afin de dégager les principes de leur dynamique de long terme. Le modèle est donc simulé sur une période qui va de 1950 à 2100 avec des « pauses » en 1990 et en 2030 pour modifier éventuellement les variables de commande politique. Ces variables de commande correspondent à des objectifs en matière de densité, de consommation énergétique, de transport, d'usage du sol et d'activité économique.

La figure ci-dessous illustre les possibilités de Ugrow en ce qui concerne l'évaluation des politiques spatiales en termes de développement durable. Il s'agit d'une copie d'écran montrant l'impact de deux scénarios sur l'empreinte écologique globale et par habitant de la communauté ainsi que l'empreinte écologique spécifique de certaines activités ou secteurs.



6.3.2.4 Conclusion

Ugrow confirme que l'atout principal de l'approche en terme de systèmes dynamiques réside dans son caractère transdisciplinaire qui lui permet de représenter des dynamiques de nature ontologiques très différentes avec les mêmes outils, les mêmes concepts et les mêmes relations fonctionnelles. Par ailleurs, l'insistance sur la nécessité de simuler les systèmes sur une longue période pour tester la robustesse du modèle contribue à faire des modèles de dynamique des systèmes des outils intéressants pour étudier les évolutions de longue durée et les phénomènes de croissance, équilibre et stagnation qui caractérisent les implantations humaines. En revanche, on peut les trouver moins bien adaptés à l'étude du court terme et aussi à la représentation de temporalités différentes. Dans la mesure où tous les composants (sous-systèmes) d'un modèle de dynamique des systèmes partagent le même niveau de résolution numérique (ce qu'on appelle le « pas de simulation » et qui est la valeur du « dt » des équations de niveau) il n'est guère aisé de modéliser simultanément des systèmes à évolution très lente et d'autres à évolution rapide. De même, les modèles de ce type éprouvent certaines difficultés à représenter l'espace de façon adéquate, sauf à adopter l'approche retenue par Costanza et son équipe (Maxwell et Costanza, 1994) qui constitue une espèce de mixte entre une approche de

type « automate cellulaire » et dynamique des systèmes. Chaque cellule de l'espace est représentée comme un système dynamique qui entretient des échanges avec les cellules avoisinantes. Chaque cellule est représentée par un modèle identique en termes de structure et de relations fonctionnelles (toutes les équations sont les mêmes) mais chacune diffère évidemment des autres par les valeurs instantanées de ces variables. Il s'agit évidemment d'une approche extrêmement puissante mais aussi très exigeante en termes de capacités de calcul et de données initiales.

6.3.3 Les modèles multi-agents

6.3.3.1 ABLOoM

Il s'agit d'un modèle multi-agent qui simule les choix de localisation de deux types d'agents : les ménages et les entreprises. L'objectif du modèle est de rendre compte de deux phénomènes antinomiques et pourtant simultanés et dont la théorie économique issue de von Thünen et d'Alonso et Muth est impuissante à rendre compte :

- la constitution de « clusters » locaux d'entreprises, c'est-à-dire la recherche par les entreprises d'une localisation à proximité d'autres entreprises semblables ou complémentaires, un phénomène dont A.Marshall avait déjà constaté l'existence.
- La dispersion de l'habitat dans les zones péri-urbaines (« *sprawl* »), c'est-à-dire la recherche par les ménages non d'une proximité comme dans le phénomène des clusters d'entreprise mais au contraire d'un éloignement, d'une distanciation les uns par rapport aux autres.

La notion de « clusters » d'entreprises recouvre en fait deux phénomènes légèrement différents. Dans un cas il s'agit de la concentration en un même lieu d'entreprises et d'institutions interconnectées, dans l'autre la concentration d'entreprises indépendantes les unes des autres dans les zones urbaines. Les deux phénomènes s'expliquent, en théorie économique, par la recherche d'externalités positives liées à la proximité d'entreprises de même nature ou complémentaires ou encore de marchés (main d'œuvre qualifiée, fournisseurs, sous-traitants...). Mais les explications strictement économiques ne suffisent probablement pas à rendre compte du phénomène de façon totalement satisfaisante (Anas et al. 1998). Il faut sans doute faire appel à des notions plus floues mais qui n'en recouvrent pas moins une réalité importante comme le « capital social ».

Ce que cherche à faire ABLOoM, c'est à rendre compte de ces deux phénomènes émergents, macroscopiques, à partir de comportements d'agents individuels de deux types : des ménages et des entreprises.

Ces agents sont disposées sur un treillis⁵¹ de 101 * 101 cellules représentant l'espace. Chaque cellule est constituée d'un empilement de couches⁵² (comme dans la représentation vectorielle d'un SIG), dont :

- une couche de base indiquant la nature du substrat : sol, aire naturelle, mer. Ces attribut sont fixes. Les agents ne peuvent occuper que des cellules de type « sol » mais peuvent

⁵¹ Plus précisément, il s'agit d'un toron.

⁵² Une seule étant visible à la fois, dans la représentation graphique.

chercher à se rapprocher des cellules des deux autres types. Une cellule occupée par un agent quelconque voit son statut passer de « libre » à « occupée ».

- une couche d'attractivité qui permet la simulation des phénomènes d'agglomération. L'attractivité est un attribut de l'environnement liée pour certains agents à la présence d'autres agents d'un certain type. Il y a donc autant de formes d'attractivité que de types d'agents. Par exemple, la présence d'entreprises peut attirer certains types de ménages mais en repousser d'autres.

Les agents, entreprises et ménages, peuvent être établis ou non. A l'initialisation chaque agent se voit assigner une position originelle aléatoire⁵³ et est considéré comme « non-établi ». Ensuite, chaque agent se met en quête d'un lieu où s'établir en fonction de ses règles de comportements et de ses « compétences ». Une cellule ne peut être occupée que par un seul agent. Les modes d'exploration des agents sont de deux types : ou bien chaque agent explore l'ensemble de l'espace en commençant par la cellule (0,0), ou bien il explore son environnement en partant de sa position instantanée et en explorant progressivement des cellules de plus en plus éloignées et en s'arrêtant sur la première qui lui convient.

a) Les ménages

Ils se caractérisent par une préférence variable pour l'emploi, le voisinage, les services publics et l'environnement. Par hypothèse, chaque ménage comprend un de ces membres employés dans un des trois secteurs économiques : industrie lourde, autres industries et services. Le revenu du ménage dépend du secteur d'activité : inférieur pour l'industrie lourde, moyen pour les autres industries, élevé pour les services. Chaque ménage a également une préférence variable pour la proximité avec d'autres ménages de même catégorie. La recherche d'un niveau élevé ou plus faible d'offre de services est également un facteur constitutif des préférences en matière de localisation. Le niveau d'offre de services est fonction de la densité de population. Les ménages désireux d'accéder à de nombreux services choisiront de s'établir dans les zones fortement peuplées. Les préférences en matière d'environnement sont modélisées en terme de distance minimum par rapport à une aire naturelle. Chaque ménage présente enfin un degré variable d'information concernant son environnement, représentée par le nombre de cellules dont il peut connaître les propriétés et où il peut donc envisager de s'installer. Le degré d'information accessible à chaque ménage est également fonction de son revenu : un ménage à revenu élevé peut se permettre une recherche plus longue qu'un ménage moins fortuné et peut également payer des coûts de transport plus élevés vers leur lieu de travail ou de loisir

b) les entreprises

Les entreprises sont caractérisées par leur secteur d'activité, leurs besoins en main d'œuvre et leur usage de ressources naturelles. Les besoins en main d'œuvre et en ressources naturelles sont caractérisées de façon qualitative en besoins importants, moyens et faibles. Elles sont également plus ou moins « compétentes » en termes d'information, au même titre que les ménages.

⁵³ La position initiale des agents exerce une influence sur les résultats de la simulation. Ce type de modèle est en effet sensible aux conditions initiales, d'où la nécessité de réaliser un échantillon de simulations. De même, les patterns de localisation qui peuvent émerger au cours des simulations sont différents selon l'ordre dans lequel les agents sont activés.

c) Les règles de comportement

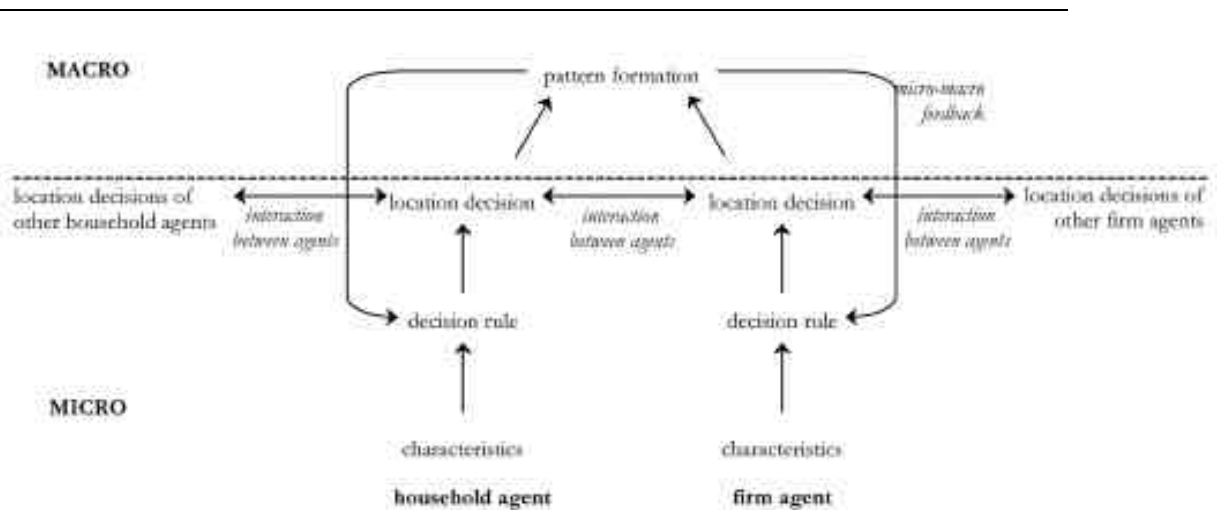
Celles-ci varient en fonction du type de ménage. Le modèle distingue 5 types de ménages.

1. Les ménages de type 1 sont appelés « pionniers ». Ils constituent la première vague de peuplement et obéissent à une règle très simple : effectuer une recherche aléatoire sur les cellules environnantes et s'installer sur la première cellule vacante.
2. Les ménages de type 2, à revenu faible. Ils ne peuvent trouver d'embauche que dans le secteur manufacturier et sont assignés aléatoirement soit à l'industrie lourde soit aux autres industries. Leurs préférences les poussent à rechercher le voisinage de ménages du même type, à vivre à proximité de leur lieu de travail. Ils n'ont pas d'exigence spécifique en termes de services – quoique leur niveau d'exigence croisse avec le temps- ni en ce qui concerne l'environnement.
3. Les ménages de type 3 sont semblables aux ménages de type 2 à ceci près qu'ils disposent de revenus supérieurs et peuvent être embauchés partout sauf dans l'industrie lourde. Ils recherchent les zones à haut niveau de services. Ils ont aussi une certaine recherche de qualité d'environnement et ne désirent pas vivre à proximité d'une zone trop industrielle.
4. Les ménages de type 4 ont une préférence marquée pour l'environnement qui constitue leur seul critère de recherche de localisation.
5. Enfin, les ménages de type 5 sont principalement caractérisés par leur répugnance à vivre à proximité d'autres ménages. Ils chercheront donc des cellules distantes d'au moins 10 cellules d'une autre occupée par un ménage.

ABLOoM distingue 3 types d'entreprises, chacun d'entre eux comprenant deux sous-types :

1. Les entreprises de type 1 sont du secteur manufacturier et ont des besoins moyens en termes de main d'œuvre et de ressources naturelles. Certaines d'entre elles cherchent à se situer à mi-distance entre les sites naturels et les zones habitées (1.a), d'autres vont là où l'attraction (effet d'agglomération) pour ce genre de firme est le plus élevé (1.b), c'est-à-dire là où se trouvent déjà des firmes de niveau 1.
2. Les entreprises de type 2 relèvent du secteur des services. Elles ont d'importants besoins de main d'œuvre mais n'utilisent pas de ressources naturelles. Les firmes de type 2.a cherchent donc à s'implanter dans les zones à forte offre de travail qualifié (ménages du type 3) les autres se localiseront en fonction du degré d'attractivité qui les concerne.
3. Les entreprises de type 3 appartiennent au secteur de l'industrie lourde qui a peu de besoins en main d'œuvre mais de fortes exigences en ressources naturelles. Le type 3.a va donc chercher à minimiser sa distance d'une zone naturelle, le type 3.b s'agglomérant de préférence avec d'autres entreprises du même type.

Le schéma ci-dessous rend compte des interactions entre les décisions de localisation des firmes et des ménages et entre niveau micro et niveau macro.



d) Résultats

Les simulations permettent de distinguer 3 phases dans l'évolution de l'occupation de l'espace. Tout d'abord une phase initiale suivie d'une phase de croissance et enfin d'une phase d'équilibre. Dans la phase initiale, seul un petit nombre d'agents est « établi », la majorité étant en quête d'une localisation. Suit une phase de croissance avec de plus en plus d'agents fixés et, de ce fait, des effets d'agglomération de plus en plus prégnants. Enfin, en phase d'équilibre tous les agents sont fixés, ce qui ne signifie pas que certains d'entre eux ne chercheront pas à améliorer leur situation en cherchant un endroit plus adéquat.

Les résultats sont très différents selon que les agents ont une compétence maximale ou limitée. Ainsi, le fait de limiter le niveau de « compétence » des seuls ménages de type 2, conduit à des formes de répartition spatiale très différentes. Le nombre d'agglomérations (*clusters*), en particulier, passe de 1 à 3.

6.3.3.2 Evaluation du point de vue du développement durable

On a compris que l'exemple présenté ci-dessus n'a rien à voir avec un modèle d'aide à la décision au sens habituel du terme. Il ne s'agit pas, pour les auteurs, de résoudre un problème pratique général en travaillant sur une espèce de « type-idéal » comme dans le cas d'*Urban Dynamics*, ni de modéliser de façon réaliste une ville ou une région particulière comme dans le cas de TRANUs ou UrbanSim. L'ambition ici est de comprendre comment des comportements relativement élémentaires peuvent générer des structures complexes d'occupation de l'espace. L'objectif est donc beaucoup plus cognitif que pragmatique. Ce qui est intéressant, dans le contexte qui est le nôtre ici, est le potentiel que cette application laisse entrevoir en termes de développement durable. Par exemple, la dialectique du local et du global, de l'individuel et du collectif trouve ici une représentation simple et satisfaisante. La diversité reconnue des motivations et des compétences ouvre la voie non pas seulement à une interdisciplinarité limitée aux échanges entre les sciences de la nature et l'économie – ce à quoi elle se réduit dans bien des cas – mais, chose plus difficile, à une vision interdisciplinaire du comportement humain où la sociologie, la psycho-sociologie, l'histoire même peuvent trouver place. Le caractère vraisemblable des hypothèses sur le comportement par rapport à des modèles de type « maximisation d'utilité » constitue aussi un atout pour la participation des parties prenantes qui peuvent s'identifier à tel ou tel type de motivation et de perception.

On retrouve en effet ces propriétés dans le logiciel PolSim qui vise à des applications de politique urbaine concrètes.

6.3.3.3 *Policy Simulator (PolSim)*

Il s'agit d'un des éléments d'une suite logicielle nommée «CommunityViz» dont l'objectif est d'aider les responsables de communautés locales rurales à prendre des décisions en matière d'aménagement du territoire. A côté de l'outil «PolSim («policy simulator»», le «package» comprend des outils de visualisation spatiale (en trois dimensions) et d'analyse d'impact. Les outils spécialement adaptés aux petites entités sont suffisamment rares pour que l'on ne passe pas sous silence ceux qui existent. Celui-ci offre en plus l'avantage de s'appuyer sur une méthodologie multi-agents pour simuler les comportements des acteurs locaux : entreprises, individus et ménages. Les données concernant ces acteurs sont recueillies par enquête (généralement téléphonique). Elles portent sur leurs caractéristiques socio-démographiques et économiques mais également sur leurs intentions et leurs croyances. A cet égard, l'approche adoptée par PolSim est assez nouvelle. Ayant constaté que les déterminants socio-démographiques et économiques des ménages étaient généralement de bien meilleurs prédicteurs des attitudes que la localisation géographique, PolSim est livré avec une base de données comprenant un échantillon-type de ménages, représentatif de la population des USA. L'adaptation du logiciel aux réalités locales consiste alors pour l'utilisateur, à extraire de cette base de données le nombre de ménages ayant les caractéristiques correspondant aux spécificités socio-démographiques locales. Bien entendu, ceci est une facilité offerte à l'utilisateur mais il n'est en rien obligé de s'en servir. Il lui est parfaitement loisible de constituer son échantillon de ménages sur base d'une enquête ou d'une autre source de données. Le procédé est le même pour les entreprises et pour les immeubles. Ainsi, le logiciel comprend une «bibliothèque» d'immeubles avec leurs différentes caractéristiques (nombre d'étages, utilisation, coût de construction). Le calibrage du modèle consiste à associer chaque immeuble de l'entité modélisée à un immeuble-type de la bibliothèque.

Le comportement de consommation des ménages est abordé à travers deux fichiers : l'un comprenant des achats spécifiques de ménages résidants, l'autre les achats de ménages non-résidants, assimilés à des touristes. Le fichier des achats des résidants comprend 10 catégories de biens de consommation courante et les quantités de ces biens consommés par les ménages en fonction de leur revenu et de leur situation en termes de cycle de vie (ménage avec enfants en bas-age, avec adolescents, parents âges sans enfants, etc.). Le comportement migratoire est représenté par une base de données distinguant mouvements à courte distance et à longue distance selon les caractéristiques socio-démographiques des ménages. Quant aux événements liés au cycle de vie (mariages, divorces, naissances, décès) ils figurent dans un autre fichier reprenant les occurrences de ces événements en fonction de l'âge, du sexe, de la race, etc.

Sur base de ces informations, l'utilisateur de PolSim crée sa propre base de données correspondant aux caractéristiques des ménages, des entreprises et des immeubles de la localité. Pour cela, il suffit d'entrer dans le logiciel un certain nombre de statistiques agrégées quant au nombre de ménages, par exemple, leur répartition par classe de revenu, par taille et autres caractéristiques pertinentes. Cette information permet à PolSim de tirer de sa base de données un sous-échantillon de ménages correspondant à ces spécifications. La logique est la même pour la constitution de la population des entreprises. Les populations de ménages et d'entreprises sont ensuite associées à un bâtiment sur base de la liste-type de bâtiments fournie par le logiciel.

Pour calibrer⁵⁴ les modèles, PolSim fait appel à des méthodes relativement récentes telles que les algorithmes génétiques et le recuit simulé.

⁵⁴ Rappelons que calibrer un modèle consiste à déterminer les valeurs de ses paramètres de sorte que les résultats calculés soient le plus proche possible des données observées.

Les agents pour PolSim sont les entreprises d'une part et, d'autre part, toute « personne » de 18 ans ou plus. Ils sont dotés de propriétés cognitives et de préférences, interagissent les uns avec les autres (mariages, divorces, fréquentation scolaire, transactions commerciales, etc.) et avec leur environnement. Ils prennent des décisions en matière de consommation, de localisation, de déplacements, de vie professionnelle et familiale. De plus ils sont reliés les uns aux autres par des relations familiales, professionnelles et de voisinage.

Un exemple : chaque mois de simulation, les ménages doivent acquérir un certain nombre de biens de consommation, dont la quantité et la qualité dépendent du revenu du ménage et de sa composition. Pour chacun de ces produits, le ménage doit sélectionner un point de vente, parmi les différents commerces possibles, sur base de critères de prix et de qualité des produits et d'éloignement par rapport au domicile ou au lieu de travail. Bien entendu, la décision dépend des possibilités du ménage en matière de mobilité.

Un des aspects intéressants de PolSim est l'évaluation de la qualité de vie des agents. Celle-ci est basée sur deux facteurs : l'évolution de leur situation économique et le degré de concordance entre leurs valeurs et préférences et leur environnement social et physique. Chaque agent a donc sa propre évaluation de sa qualité de vie. Il ne s'agit donc d'une propriété de la localité elle-même mais d'une évaluation subjective des habitants eux-mêmes. Le niveau de qualité de vie perçue et plus encore son évolution intervient dans de nombreuses décisions prises par les agents.

6.3.3.4 Conclusion

Les deux exemples présentés ici sont évidemment loin de rendre compte de la diversité des applications du paradigme multi-agents dans le domaine de l'aménagement de l'espace. Ainsi, l'équipe de Bousquet au CIRAD a développé de nombreuses applications dans le domaine – très proche – de l'utilisation des ressources naturelles et de l'occupation de l'espace rural (Bousquet *et al.*), notamment dans des pays africains, à l'aide du logiciel CORMAS qu'ils ont mis au point à cet effet.

La force des modèles développés par cette école tient dans la richesse de sa représentation de l'espace. Car, il existe deux façons de concevoir l'espace : comme simple support ou comme agent. Ainsi que l'écrivent Bousquet et Gauthier (1999)

« ...deux approches sont possibles. (1) On peut s'intéresser aux " acteurs " du territoire (éléments) et aux relations qu'ils entretiennent avec l'espace et les ressources qui s'y localisent (interactions). Dans cette approche, l'espace est perçu comme le support des interactions entre les sous-systèmes naturels et sociaux qui produisent de la différenciation spatiale. L'organisation spatiale résulte de l'impact des interactions entre acteurs sur l'espace, agissant lui-même comme une contrainte dans les comportements. (2) On peut également s'intéresser aux entités spatiales (éléments) et aux relations qu'elles entretiennent avec les autres entités spatiales du système (interactions). Dans cette deuxième approche l'organisation spatiale est perçue comme le produit des interactions entre les entités spatiales, celles-ci étant liées au comportement des acteurs. ». Ce que permet l'approche multi-agents c'est la conjonction des deux points de vue. Ceci est particulièrement net dans la conception du logiciel NetLogo qui constitue un environnement de simulation multi-agent. Deux sortes d'agents y sont considérés : les " turtles », terme générique pour désigner n'importe quel agent non-spatial et les « patches » qui désignent les unités spatiales sur lesquelles évoluent les « turtles ». Les interactions possibles sont de type « turtle-turtle », « turtle-patch », « patch-patch » et « patch-turtle ».

Autre atout des modèles multi-agents : l'intégration des parties prenantes à la prise de décision, y compris aux stades les plus précoces. Il est d'ailleurs intéressant de constater que le CIRAD

met de plus en plus clairement en avant comme utilité et qualité première de leurs modèles la participation des parties prenantes (D'Aquino et al. 2003). Selon eux :

« to truly integrate people and principals in the decision-making process of land use and management and planning, information technology should not only support a mere access to information but also help people to participate fully in its design, process and usage. That means allowing people to use the modeling support not to provide solutions, but to help people to steer their course with an incremental, iterative and shared decision-making process” (D'Aquino et al., 2003, p.1).

L'accent mis sur le caractère itératif, incrémental et participatif du processus de prise de décision n'est pas sans rappeler les définitions les plus courantes du SIA ou du *Sustainability Appraisal*. De là à penser que la modélisation multi-agent pourrait s'avérer la voie royale vers le SIA, il y a un pas que certains comme Marco Janssen (2003) par exemple, n'hésitent pas à franchir. Nous serions plus réservés compte tenu du caractère encore expérimental de la plupart des applications et le petit nombre de tests en « grandeur nature » de l'approche. Un des problèmes que celle-ci soulève tient à la facilité avec laquelle on peut représenter des modèles de comportement humain qui s'écartent du modèle de l'*homo oeconomicus*. Ce qui constitue une force à un certain égard peut aussi bien devenir une faiblesse parce que la tentation peut être grande de postuler des types (« patterns ») de comportement humain parfaitement arbitraires, insuffisamment fondés en termes psycho-sociologiques. En revanche, ce que démontre ABLOoM, c'est le potentiel de la modélisation multi-agent pour explorer des questions théoriques relatives au développement durable sans faire l'impasse sur les non-linéarités et les profondes complexités engendrées par l'interaction des systèmes humains et des systèmes naturels. Faut-il rappeler que sans compréhension théorique des causes et des mécanismes de la non-durabilité, il n'est pas d'application pratique ni de décision réellement satisfaisante ?

6.4 Conclusions sur les modèles d'aménagement du territoire

Nous avons présenté quelques exemples de modélisation dans le champ de l'aménagement du territoire au sens large, représentatifs de différentes écoles méthodologiques et de différents usages possibles. Alors que TRANUS, UrbanSim, Ugrow, PolSim ont pour ambition d'aider les responsables d'une entité administrative urbaine ou régionale à gérer concrètement les problèmes d'urbanisme, de mobilité – et pour certains d'entre eux, d'environnement- qui se posent à elle, *Urban Dynamics* cherche plutôt une solution globale à une classe de problème pratiques auxquels se trouvaient confrontées, à l'époque, la plupart des grandes cités américaines. Quant à ABLOoM, il se donne pour objet la compréhension de l'origine de la formation des agglomérations ou du phénomène de péri-urbanisation à partir des comportements individuels d'acteurs fortement stylisés.

Tous ces types de modélisation sont utiles y compris pour l'aide à la décision en matière de développement durable. Il est d'ailleurs remarquable que les évolutions méthodologiques récentes de chacun de ces outils aient précisément pour objectif premier une meilleure prise en compte des exigences du développement durable. On a vu que le projet européen PROPOLIS consistait en une adaptation de MEPLAN à cette problématique. Il en va de même pour les dernières versions d'UrbanSim. On peut en dire autant de ILUMASS, une évolution du modèle IRPUD destinée à permettre la modélisation du développement durable. Ces évolutions présentent un certain nombre de points communs :

- une désagrégation plus fine ;
- le recours à la micro-simulation ou à une approche multi-agent ;

-
- l'usage des SIG ;
 - la modularité (modules distincts pour la formulation des scénarios, l'analyse des politiques, la gestion de la base de données, le ou les modèles proprement dits, les résultats des scénarios (indicateurs, visualisation) et l'évaluation.

Toutes ces évolutions sont de nature à permettre une meilleure prise en compte de deux éléments importants mais généralement négligés dans les approches classiques : l'environnement, d'une part et l'équité (intragénérationnelle et intergénérationnelle) de l'autre. L'absence d'intérêt pour certains aspects au moins de l'équité intergénérationnelle est apparente dans le traitement de la pollution par les modèles de première génération : même lorsqu'elle est y plus ou moins prise en compte, ce n'est généralement que sous l'angle des émissions, pas des immissions⁵⁵, si bien que les victimes⁵⁶ de ces pollutions ne peuvent jamais être identifiées dans le modèle.

L'évolution qui se fait jour dans ce domaine est extrêmement encourageante au point que l'on peut légitimement se demander si elle ne préfigure pas l'avenir de la modélisation du développement durable « tout court ». Ce n'est pas du tout un résultat attendu de cette recherche mais il nous apparaît de plus en plus clairement que non seulement les modèles d'occupation de l'espace et de transport sont déjà et seront demain de plus en plus capables de s'adapter aux exigences posées par le développement durable mais même qu'ils sont les plus proches aujourd'hui de ce que l'on pourrait attendre d'outils d'aide à la décision en la matière. Cela tient d'abord, pensons-nous, à ce qui les caractérise le mieux : la représentation explicite de l'espace. En effet, la prise en compte de l'environnement et des ressources naturelles est d'autant plus complète et fine que l'espace est perçu de façon dynamique et non comme simple support. C'est le cas par exemple dans le modèle PLM (Patuexent Landscape Model) développé par Costanza et al. C'est le cas également dans bon nombre d'applications de MAS menée par l'équipe du CIRAD avec le logiciel CORMAS (Bousquet et al). C'est que la représentation de l'espace au niveau le fin possible et avec les moyens des SIG actuels permet de rencontrer de façon élégante un certain nombre de critères qui nous étaient apparus comme constitutifs de la connaissance du développement durable : l'interdisciplinarité, les interactions entre niveaux (local-global) et la participation des parties prenantes en particulier.

L'usage de systèmes d'information géographique en interaction avec des modèles de simulation socio-démo-économique ouvre la porte à une représentation satisfaisante de l'environnement. Il permet, par exemple, de modéliser des phénomènes typiquement « spatiaux » de diffusion, concentration, dilution, contagion, etc., qui sont caractéristiques des pollutions par exemple mais aussi des épidémies, et de certains comportements sociaux. La collaboration interdisciplinaire s'en trouve facilitée, et cela, non seulement avec les spécialistes de l'environnement mais également avec les épidémiologistes, les sociologues, etc. Elle rend possible aussi la visualisation de phénomènes complexes qui peuvent alors être appréhendés de façon relativement intuitive. Enfin, grâce aux techniques de représentation et de simulation en 3D, elle permet de traduire dans des images extrêmement réalistes les effets visuels (sous différents angles de vue) sur le paysage des décisions en matière d'aménagement du territoire et d'urbanisme. Il est clair que ces possibilités ouvrent la voie à une participation accrue des

⁵⁵ Ce point est bien mis en évidence par Michael Wegener dans son adresse inaugurale « Land Use and Transport Model Integration : Progress and Future Directions » au Congrès international de Portland « Integrating Land Use and Transport Model » de 1998.

⁵⁶ C'est-à-dire des zones affectées par ces pollutions et donc aussi des populations qui en seront victimes.

parties prenantes dès lors qu'elles sont confrontées aux résultats tangibles des politiques en discussion.

Un autre atout des modèles d'occupation de l'espace et de transports est qu'ils ont, pour la plupart⁵⁷, dorénavant déjà résolu le problème de la cohabitation de temporalités différentes. En effet, les processus modélisés par ces outils vont du long terme, même très long terme (les routes, les canaux, les structures urbaines et spatiales, etc.) au très court terme (les déplacements heure par heure) en passant par le moyen-long terme (le cycle de construction, vieillissement et destruction des immeubles) et le moyen-court terme (l'occupation des bureaux par telle ou telle activité économique, la succession des ménages dans un logement).

Enfin, il ne faut pas perdre de vue que bon nombre de ces modèles sont aussi – et avant tout, pour certains - des modèles économiques qui n'ont peut-être rien à envier à certains modèles purement économiques dépourvus, pour leur part, d'interprétation spatiale. Il reste à démontrer que ces modèles d'économie spatialisée sont moins rigoureux, précis ou utiles que les modèles purement économiques. Mais si, au contraire, ils offrent des performances équivalentes en termes strictement économiques à ces derniers, alors leur ouverture sur la démographie, l'environnement, etc., pourrait conduire à ce qu'ils les supplantent, tôt ou tard.

⁵⁷ Les modèles de dynamique des systèmes souffrent d'un certain handicap dans ce domaine.

Chapitre 7. Synthèse et pistes de recherche

Ce dernier chapitre a pour objectif de synthétiser les principaux résultats de cette recherche et leur contribution à la question qui l'a motivée : comment améliorer les modèles utilisés en soutien à la prise de décision en matière de développement durable. Ce chapitre est organisé en deux sections ; la première présente ces principaux résultats ; la seconde énonce une série de pistes de recherche.

7.1 Principales conclusions de l'étude

La première conclusion qui s'impose au terme de cette recherche est l'absence d'une méthodologie éprouvée qui permette de confronter les outils scientifiques aux questions ou problèmes à résoudre en sorte d'aider le preneur de décision à sélectionner en connaissance de cause les meilleurs instruments scientifiques pour éclairer la décision à prendre. Il nous a donc fallu concevoir une méthodologie pour répondre à cette question: quelles sont les approches qui se prêtent le mieux à une analyse en termes de développement durable et pourquoi ? L'approche suivie ici a consisté à dégager quelques critères auxquels on a confronté tour à tour des types de modèles et des problématiques. Ces critères sont ceux que l'on retrouve au centre de tous les grands problèmes qui ont amené la prise de conscience de la nécessité d'un développement durable : réchauffement climatique, épuisement de ressources renouvelables, perte de biodiversité, etc. La première étape de l'étude a donc consisté en une confrontation de quelques approches en matière de modélisation « appliquée » à ces critères. Comme on l'a vu, cinq critères ont été retenus : le caractère (actuellement ou potentiellement) interdisciplinaire, la prise en compte des générations futures ou du moyen et long terme, le traitement des différentes espèces d'incertitude, le traitement de niveaux multiples et emboîtés de définition des phénomènes et le potentiel en termes de participation des parties prenantes.

Tous les types de modélisation n'ont pas été pris en considération. Notre examen s'est limité d'une part aux principaux types de modèles utilisés en Belgique pour éclairer la décision en matière économique et environnementale et d'autre part à quelques approches plus récentes ou moins pratiquées chez nous et dont il nous paraissait important d'évaluer les potentialités. Dans la première catégorie, on peut ranger les modèles macro-économétriques (Hermès, par exemple), d'équilibre général calculable (Gem-E3 par exemple) et d'optimisation centralisée (Markal par exemple). Dans la seconde, les modèles de dynamique des systèmes, les réseaux probabilistes (ou bayésiens) et les modèles multi-agents.

L'évaluation a pris uniquement en compte les critères d'ouverture sur le développement durable, sans considération pour des critères épistémologiques et méthodologiques classiques, si bien que les approches qui paraissent plus aptes que d'autres à aborder une problématique de développement durable peuvent, éventuellement, être celles qui souffrent des plus grandes faiblesses en regard de ces critères « traditionnels ». N'ayant pas analysé les différents paradigmes de modélisation sous cet angle, nous ne pouvons pas apporter ici d'informations ou

de jugements originaux concernant leurs propriétés épistémologiques ou méthodologiques. Néanmoins, la « fiche-type » au moyen de laquelle nous dressons la carte d'identité de chaque approche comprend une rubrique « atouts et faiblesses » et fait le plus souvent référence à ces critères plus généraux.

Au terme d'une première évaluation où sont confrontés directement modèles et critères, il apparaît que les approches qui, *a priori*, sont les plus prometteuses en regard de nos critères de développement durable sont aussi les moins connues et les moins pratiquées : les modèles multi-agents, les réseaux bayésiens et les modèles de dynamique des systèmes. Il est vrai que pour les deux derniers, il s'agit déjà d'approches « intégrées », ce qui explique notamment leur ouverture plus importante sur l'interdisciplinarité et l'incertain. Les approches plus traditionnelles sont évidemment quelque peu injustement pénalisées : les modèles macro-économétriques ou d'EGC, par exemple, n'ont pas pour vocation première l'interdisciplinarité ou l'exploration du long terme. Par ailleurs, il est parfois, ou éventuellement envisageable qu'elles offrent des garanties supérieures aux autres en termes de base scientifique, de rigueur dans les procédures d'identification et de validation, etc. Le fait est, cependant, que des modèles d'EGC, macro-économétriques et d'optimisation centralisée sont utilisés pour aider à la prise de décision dans des matières qui relèvent du développement durable. Il n'est donc pas inutile de pointer les directions dans lesquelles il nous semble important qu'ils évoluent pour offrir de meilleures performances. Il n'est pas non plus inutile d'informer de potentiels futurs utilisateurs de ces outils de leurs principales limites. Ainsi, le choix d'une approche en termes d'optimisation centralisée n'est peut-être pas le plus judicieux si la participation des parties prenantes constitue une condition importante de succès. Ou encore, une approche en termes de dynamiques des systèmes n'est peut-être pas la meilleure façon d'aborder des problématiques ou l'interaction entre niveaux est importante, et ainsi de suite.

C'est que l'adéquation d'une approche à une problématique concrète ne dépend pas seulement de ses performances intrinsèques en regard des cinq critères retenus : elle dépend aussi de l'importance relative de ce critère pour cette problématique particulière. En effet, si les critères retenus sont toujours peu ou prou présents dans toute problématique de développement durable, ils ne le sont pas partout au même degré, avec la même intensité. La comparaison des deux thématiques prises ici à titre d'exemple en témoigne clairement. Il est ressorti des discussions en comité d'utilisateurs que la thématique de l'énergie, par exemple, demanderait avant tout une approche de long terme et que la participation des parties prenantes y serait le critère relativement le moins important. Il n'en va pas de même en matière d'aménagement du territoire où, au contraire, c'est la participation qui se révélerait le critère le plus important à prendre en compte, devant les considérations pour le long terme et l'intergénérationnel. Quant au critère « local-global », il viendrait en 3^{ème} position dans le cas de l'énergie, en dernière dans le cas de l'aménagement du territoire. Chaque problématique ou thématique a donc ses exigences propres, si bien qu'il ne suffit pas, pour juger de l'adéquation d'une approche à une thématique précise de développement durable, de connaître ses performances vis-à-vis de critères généraux : encore faut-il pondérer cette évaluation par l'importance de chaque critère pour la thématique en question. A cet effet, il nous a fallu décomposer chaque thématique en problématiques et se demander pour chacune d'entre elle l'importance relative des cinq critères sélectionnés. Le poids global d'un critère pour l'ensemble de la thématique correspond alors à la moyenne (sans pondération) de ses importances locales, pour chaque problématique. Pour obtenir au bout du compte une appréciation de l'adéquation des types de modèles aux thématiques on peut alors tirer parti du fait que si une approche est adéquate pour tel ou tel critère et que ce critère se révèle important pour telle ou telle thématique (parce qu'il est important pour la plupart des problématiques qui la constituent) alors elle est nécessairement adéquate pour la thématique en question. Ou, inversement, si l'approche est relativement déficiente pour un critère qui n'intervient lui-même que faiblement dans une thématique, cette faiblesse ne constitue pas un handicap majeur pour l'approche en question par rapport à cette dernière. Nous avons tiré largement parti de cette relation logique en utilisant un système de

cotations pour exprimer l'adéquation des modèles aux critères ainsi que des critères aux thématiques et, en exploitant les propriétés de la multiplication matricielle, pour en déduire l'adéquation des différents types de modèles aux thématiques.

Cette méthode, qui ne s'est imposée que petit à petit au cours de la recherche, devrait faire l'objet de nombreuses améliorations avant d'être éventuellement proposée à d'autres usages, étendues à d'autres thématiques ou appliquée en grandeur réelle. Par ailleurs, la procédure d'attribution des cotes pourrait être objectivée par l'utilisation d'outils éprouvés comme, par exemple, l'analyse hiérarchique multicritère (Saaty, 1981)⁵⁸ et par la participation d'un plus grand nombre de modélisateurs et d'utilisateurs. Il nous semble cependant que, moyennant quelques adaptations et améliorations, la démarche suivie ici pourrait en effet s'appliquer à d'autres thématiques (du développement durable ou non) ou encore à d'autres types d'outils. Il s'agit, dans tous les cas, de se donner un certain nombre de critères dont on évalue l'importance relative pour les différentes facettes du problème à traiter et à l'aune desquels on mesure également les performances de différents outils scientifiques ou techniques. On peut obtenir alors, par une simple multiplication matricielle, une grille d'évaluation de l'adéquation des outils au problème à traiter. On peut du reste procéder dans un ordre différent, puisque, en multipliant la matrice « critères-problèmes » par la matrice « problèmes-outils », on obtient une matrice « critères-outils ».

Quoiqu'il en soit, les conclusions qui se dégagent de ce type d'analyse, et tout particulièrement de celles menées ici, restent à prendre au conditionnel du fait de leur caractère nécessairement subjectif. En effet, tant l'interprétation du sens des critères (qu'est ce que le « long terme », le « local », quelles sont les incertitudes les plus grandes, etc.) que l'appréciation du potentiel des différentes approches en matière de modélisation ont un caractère essentiellement herméneutique et donc sujet à discussion. C'est précisément cette discussion qu'il nous paraît important d'entamer et que nous avons tenté d'initier, notamment à travers le Workshop organisé conjointement par la Commission européenne et les SSTC ou lors de la table ronde consacrée à la thématique de l'énergie. En définitive, l'important n'est pas ce que nous, auteurs de la présente étude, pensons, par exemple, de l'adéquation des modèles d'optimisation centralisée à une problématique de développement durable. L'important, c'est que les concepteurs et les utilisateurs de chaque type de modèle travaillent à faire en sorte que leur outil contribue le plus efficacement possible à la prise de décision en matière de développement durable. L'identification des pistes de recherche proposées ci-après a pour objectif de les y aider.

7.2 Pistes de recherche

De nombreuses pistes de recherche ont été approchées lors de cette étude et l'on en trouvera des traces à travers l'ensemble du rapport. En voulant éviter de produire un catalogue mêlant des pistes de portées scientifiques disparates, il nous a semblé plus opportun de regrouper ces pistes sous trois thèmes méthodologiques fondamentaux. Le premier s'intéresse à la pratique des modèles, qu'ils soient existants ou en devenir, autrement dit aux manières d'améliorer leur usage et leur efficacité au sein du processus de décision et de gouvernance. Le second thème s'intéresse aux principes méthodologiques d'intégration, c'est-à-dire aux pratiques de modélisation qui permettraient de mieux prendre en considération les cinq critères qui ont guidé nos analyses. Enfin, le troisième thème porteur de pistes de recherche qui sera considéré

⁵⁸ Saaty, Thomas L., 1981, *Décider face à la complexité. Une approche analytique multicritère de décision*, Paris : Entreprise Moderne d'Édition.

s'intéressera à l'émergence d'une pratique nouvelle, le *Sustainability Impact Assessment* (SIA), et à ses rapports avec la modélisation appliquée.

7.2.1 *Du bon usage des modèles*

Un ensemble de considérations sur l'usage des modèles méritent d'être évoquées ici, sur base d'une série d'idées abordées tout au long de cette étude. Ces considérations relèvent essentiellement « du bon usage » des modèles, c'est-à-dire d'un usage qui ne soit ni abusif ni dévoyé, qu'il s'agisse de la part des modélisateurs ou des utilisateurs de résultats. Les points suivants seront discutés : Quel est le juste rôle des modèles dans le processus de décision ?, Quelles règles déontologiques ?, Comment expliciter et respecter et les limites d'un modèle ?, Comment évaluer la robustesse d'un résultat ? Quel est l'intérêt des forums et autres *peer reviews* ?

7.2.1.1 *Quel est le 'juste' rôle des modèles dans le processus de décision ?*

Cette question a constitué l'un des points de départ de cette étude : le rôle des modèles au sein du processus de décision ne doit pas être mécompris. Le modèle permet de comprendre et d'anticiper la réaction du système considéré suite à la mise en œuvre d'une politique quelconque. Une projection s'inscrit dans ce cas puisqu'elle correspond à l'évolution du système dans l'avenir à politique inchangée ; la projection révèle ce qui pourrait advenir si l'on laisse les choses se faire toutes seules, ce que reflètent des expressions usuelles telles que 'au fil de l'eau', 'laissez-faire' ou '*business as usual*'. Une fois ces éclairages fournis par les modèles, la question soulevée par le débat démocratique n'est pas résolue et il reste à choisir la politique adéquate, optimale selon les critères retenus par les instances qui ont la responsabilité de mettre cette politique en œuvre. À chaque étape de ce processus, des instruments différents peuvent être utilisés (par exemple des analyses multi-critères, des méthodes participatives, etc...), en complément de ce que les modèles auront livré comme message. Autrement dit, les modèles fournissent un éclairage sur les effets de telle ou telle politique sur le système, sans dire laquelle est préférable ; le choix reste encore à faire suivant des considérations qui ne sont plus du ressort du modèle.

En l'absence de modèles, une décision serait prise sans avoir la moindre idée (qualitative ou quantitative) de ces effets : le modèle permet donc bien d'**éclairer** la prise de décision. C'est son principal mérite. Il permet néanmoins aussi de faire discuter les parties prenantes autour des politiques envisagées, de leur faire prendre conscience des enjeux de ces politiques et de la complexité des interactions. Travailler avec un modèle un tant soi peu complexe (et la complexité, en mathématique, peut apparaître avec seulement deux équations : voir le modèle proie-prédateur ou la théorie des jeux) amène rapidement à découvrir que le 'y a qu'à' n'est pas suffisant. Il est à noter qu'un usage déplacé des modèles peut être le fait des modélisateurs aussi bien que des utilisateurs. L'on songera par exemple à l'argument d'autorité exploité autant d'un côté que de l'autre suivant lequel 'c'est le modèle qui le dit', et le modèle, c'est bien connu, est 'beaucoup trop compliqué pour que vous y compreniez quelque chose'. Cette position est évidemment contraire avec l'idée que le modèle permet d'éclairer la prise de décision : dans ce dernier cas, il sert simplement à justifier une position sur base d'un argument d'autorité, ce qui nous ramène à l'obscurantisme (autant utiliser une boule de cristal ou n'importe quelle martingale). Ce point soulève donc la difficulté d'utiliser à bon escient les modèles et leurs résultats dans le processus de décision à travers l'appropriation des capacités de ce modèles et de ses limites par les acteurs impliqués dans ce processus, ce qui a à voir avec les deux points suivants.

7.2.1.2 *Quelles règles déontologiques ?*

La déontologie consiste à utiliser un modèle ‘dans les règles de l’art’, sans sortir des limites de ce modèles ni faire preuve de malhonnêteté. Pour bon nombre de métiers, notamment ceux ayant des implications sociales directes ou mettant en état de sujétion des récipiendaires, de telles règles déontologiques existent. Pourquoi pas en modélisation appliquée, les résultats des modèles étant utilisés par des individus n’ayant pas la compétence pour remettre en question ces résultats ? Il est à noter que certaines branches de la modélisation appliquée avancent dans cette direction : c’est le cas, et le seul à notre connaissance, de la recherche opérationnelle qui réfléchit à sa fonction sociale et à la manière d’intégrer des considérations éthiques dans ses pratiques. Une série de travaux sont en cours sous l’égide de l’association européenne de recherche opérationnelle : voir la synthèse de Gallo (2003) par exemple.

Des règles suffisamment génériques pourraient être élaborées concernant la manière de procéder à une projection de référence (confrontation des hypothèses et résultats, diffusion), la divulgation publique des codes et équations du modèle, la mise en commun des bases de données. À partir du moment où des modèles sont exploités pour guider la prise de décision publique, il paraît légitime que tout un chacun puisse accéder librement aux codes sources du modèle. Dans le même ordre d’idées, les hypothèses devraient être exposées en toute clarté. Du point de vue des utilisateurs, il serait important de mettre les points forts et les limites de chaque modèle en évidence : que peut-il faire, que ne peut-il pas faire ? Cela renvoie notamment à nos critères et à la capacité de chaque modèle à en tenir compte. Bien comprises, ces limites éviteraient aux modélisateurs d’être confrontés à des requêtes qui dépassent les capacités de leur modèle (ce qui arrive sans arrêt lorsque les interlocuteurs ne comprennent ces limites, et ce qui met le modélisateurs en porte-à-faux).

7.2.1.3 *Comment expliciter et respecter et les limites d’un modèle ?*

Dans le jeu institutionnel de la prise de décision, chaque partie (utilisateurs et modélisateurs) est incitée à jouer avec ces limites. Si l’utilisateur recherche une validation scientifique à sa politique, il ne s’intéressera pas au fait que le modèle soit éventuellement utilisé au-delà de ses limites, et donc au prix d’une perte de crédibilité scientifique. Le modélisateur, de son côté, confronté à une requête de ce genre, va subir une pression pour accepter malgré tout l’exercice, soit d’autorité (si un lien hiérarchique existe entre l’utilisateur et le modélisateur), soit financière (si l’utilisateur paie le modélisateur pour obtenir un résultat). Dans un tel cas, il faudrait que le modélisateur puisse dire « cette question ne peut pas être traitée par mon modèle » et il faudrait que l’utilisateur le comprenne et l’accepte : c’est n’est pas nécessairement facile lorsque la question se situe à la frontière de ce que le modèle produit d’ordinaire, surtout si cette frontière n’est pas claire dans l’esprit de chacun. Une explicitation des limites du modèle réduit le risque d’être confronté à ce genre de situations et favorise la compréhension et l’exploitation de ses points forts ainsi, d’ailleurs, que la nécessité de continuer à améliorer et à développer le modèle. Ces éléments militent pour l’organisation de forums (voir le point 7.2.1.5) durant lesquels les modélisateurs sont amenés à discuter entre eux et avec les utilisateurs, ce qui permet une meilleure appropriation des caractéristiques et des résultats des modèles par ces derniers.

7.2.1.4 *Comment évaluer la robustesse d’un résultat ?*

L’on touche ici à la question de la validation des modèles. Avoir une confiance aveugle en un modèle est évidemment toujours dangereux et tout modélisateur vous dira qu’il passe généralement une bonne partie de son temps à vérifier les résultats fournis par son modèle. La difficulté de tenir compte des incertitudes associées à un résultat soulève cependant à la fois de difficultés méthodologiques (pour le modélisateur) et de communication (vis-à-vis de

l'utilisateur). Néanmoins, il a été vu lors de cette étude qu'une prise en compte des incertitudes était nécessaire : la Table ronde sur la thématique énergétique l'a confirmé.

Il convient de revenir ici sur une notion importante préliminaire à celle de la prise en compte de l'incertitude : la notion de robustesse. La robustesse d'un résultat de modèle est le fait que les conclusions associées à ce résultat ne sont pas altérées par la prise en compte des incertitudes. Notamment, lorsque le signe d'un effet change lors d'un test de sensibilité, cela révèle que le modèle ne permet pas de conclure. Un exemple : si l'effet sur l'emploi d'une réduction des charges patronales sur le travail financée par une taxe sur le CO₂ (scénario de double dividende) est positif avec une élasticité de l'offre de travail de 0.8 mais que cet effet devient négatif avec une élasticité de 0.9, ces deux valeurs étant considérées comme équiprobables, alors c'est que le modèle ne permet pas de dire si cette politique aura un effet positif ou négatif sur l'emploi. Le résultat du modèle n'est pas robuste.

Toute la difficulté est alors de définir les sources de l'incertitude, ainsi qu'expliqué dans le chapitre 2 de ce rapport, mais aussi de les quantifier, d'où l'intérêt, notamment, des modèles bayésiens. Il est nécessaire de développer les méthodes permettant de tenir compte des sources d'incertitudes et d'exprimer les résultats sous forme de distribution de probabilités. La présentation de résultats sous forme de fourchette est en effet source de malentendus puisque la probabilité d'occurrence du haut de la fourchette n'est pas donnée. Idem lorsque des scénarios alternatifs sont présentés (un scénario 'optimiste' et un scénario 'pessimiste') : quelle est la probabilité que l'un ou l'autre se réalise ? La médiane correspond-elle au scénario le plus probable ?

Enfin, il ne faut pas confondre l'incertitude associée à un modèle donné et celle associée à l'utilisation de plusieurs modèles. L'IPCC, en comparant différents modèles, ne fait que refléter les divergences de résultats entre les modèles retenus dans sa comparaison : ajouter un seul modèle peut suffire à élargir considérablement cet intervalle. Pour l'utilisateur, évidemment, cet intervalle de résultats indique qu'il n'existe pas de consensus entre les modélisateurs. Cet utilisateur préférerait probablement (mais ce n'est pas toujours nécessairement le cas) que les modèles fournissent un message unique et cohérent. Ceci a peu de chance de se produire : chaque modèle présente des caractéristiques techniques qui lui confèrent des propriétés différentes de son voisin ; chaque équipe de modélisation est insérée dans un contexte professionnel et institutionnel et financier spécifique qui peut, partiellement en tous cas, expliquer son type de résultat ou de message⁵⁹. La comparaison des résultats fournis par différents modèles n'est donc pas une indication de l'incertitude associée à la question considérée. À cet égard, il est intéressant de s'interroger sur la signification d'une réduction de cet intervalle : que tous les modèles fournissent le même message peut être préféré par l'utilisateur, mais est-ce pour autant plus proche de la 'vérité' et préférable du point de vue scientifique ? Pas nécessairement. Notamment, l'hypothèse suivant laquelle tous les modèles peuvent se tromper n'est pas exclue.

On arrive alors à l'importance de valider les différents modèles tout en respectant leurs spécificités. Il a été souvent évoqué dans cette étude que chaque modèle est conçu pour répondre à une série de questions généralement spécifiques : chaque modèle essaie donc d'offrir des spécificités qui lui confèrent un avantage par rapport aux modèles existants (s'il n'en était pas de même, pourquoi construire autant de modèles ?). La comparaison des propriétés entre les modèles doit donc se faire en tenant compte de des spécificités : comparer

⁵⁹ Il est bien connu que les instituts de conjoncture, qui utilisent souvent des modèles pour réaliser leurs projections de court terme, sont fortement marqués par leur appartenance institutionnelle.

les propriétés théoriques et méthodologiques est inévitable, harmoniser les hypothèses communes est facilement réalisable.

7.2.1.5 Forums et peer reviews

L'organisation de forums de comparaison est une solution efficace pour comprendre ce qui fait la force de chaque modèle et quelle est sa contribution. Plusieurs exemples existent, le plus célèbre étant l'EMF. Les SSTC ont, eux-mêmes, organisé un tel forum en 1993 pour réaliser des projections harmonisées des émissions de CO₂ en Belgique.

L'idée d'un forum est non seulement de mettre en commun les travaux mais, surtout, de faire travailler ensemble des équipes de modélisation, notamment pour une mise en commun de leurs hypothèses. La plupart de ces hypothèses, les plus cruciales souvent, devraient être communes (prix des matières premières, politiques fiscales et budgétaires, évolutions pour le reste du monde...).

Par ailleurs, la mise à disposition publique de certains types de résultats, de bases de données ou des équations du modèle sont autant de moyens d'assurer la crédibilité du modèle et de combattre l'idée qu'un modèle est une 'boîte noire'. Certes, un modèle de grande taille n'est pas compréhensible autrement que par l'expérience (et c'est d'ailleurs pour cela que l'on construit de tels modèles, parce que la dimension du problème mathématique est telle qu'une résolution analytique est impossible). Procéder à des simulations est un travail éminemment complexe et tout 'l'art' du modélisateur est de sortir des résultats à la fois pertinents et fiables de son modèle. Autrement dit, un modèle n'est pas un jeu vidéo et il ne suffit pas de faire du 'presse bouton' pour obtenir un résultat. Toutefois, mettre à disposition les sources du modèle, *a fortiori* lorsqu'il est financé par des fonds publics, est un gage de transparence. L'on trouve aujourd'hui bon nombre de modèles appliqués disponibles sous différentes versions sur internet. Le modèle de Nordhaus doit une bonne partie de son succès au fait qu'il soit librement accessible (et simple).

Enfin, l'organisation de *peer reviews* des modèles et de leurs résultats est une bonne occasion de discuter et de faire discuter les modélisateurs. Là encore, baser des décisions collectives et publiques sur des modèles qui ne le sont pas ou qui ne sont pas discutés sur la place publique pose question. Un exemple de pratique participative a été fournis lors de la Table ronde sur l'énergie où il a été mis en avant le fait que le modèle Hermès et ses résultats sont régulièrement soumis à la sagacité des membres du Conseil Central de l'Economie, voir à des questions parlementaires.

L'on trouvera des exemples récents de comparaisons de modèles et d'outils dans l'ouvrage très complet de Moffatt, Hanley et Wilson (2001) ainsi qu'une application plus poussée chez Moffatt et Hanley (2001). Notamment, un exemple de pratique combinée input-output et oprimisation est proposée par Oliveira et Henggeler Antunes (2003) ; un exercice de modélisation intégrée est effectué par Onishi (2002). Enfin, deux essais de combinaison des sphères économiques et écologiques sont proposés, un peu moins récemment, par Hofkes (1991) et Van den Bergh et Nijkamp (1996).

7.2.2 Le temps et l'espace comme principes d'intégration

Il apparaît donc que le maître-mot de l'ouverture des différents modèles vers le développement durable est celui d'*intégration*.

On peut distinguer deux formes d'intégration à l'œuvre dans la prise de décision pour un développement durable : cognitive et axiologique. Seule la première concerne les modèles ; la seconde concerne les valeurs et les préférences des décideurs et leur contenu éthique.

L'intégration dans le domaine cognitif signifie la mise en correspondance et en cohérence de concepts, de mesures et de propositions relevant :

- de types de savoirs et de discours différents ;
- de disciplines scientifiques différentes ;
- de référentiels géographiques différents ;
- de référentiels temporels différents.

Le mode le plus achevé d'intégration consiste en la création de modèles dont les éléments constitutifs sont eux-même des modèles et que l'on dénomme pour cette raison « métamodèles ». Il s'agit d'un des outils privilégiés de la SIA (*Sustainability Impact Assessme*) ; nous y reviendrons.

Il n'est pas toujours possible ni nécessaire d'atteindre un tel niveau d'intégration. Une forme affaiblie mais réaliste et incontestablement utile d'intégration consiste à rapporter les connaissances (ou les évaluations) disparates à un référentiel commun, par exemple en les exprimant dans des unités de même nature. Dans le contexte axiologique, ce référentiel peut être des « utilités » (comme dans les approches *multi-attribute utility theory*), ou un numéraire (comme dans les modèles d'équilibre général ou les analyses coûts-bénéfices). Dans le contexte cognitif, il peut s'agir de probabilités (comme dans les modèles de réseaux bayésiens), d'unités physiques (comme dans les modèles éco-énergétiques à la Odum), ou encore d'unités spatiales. L'empreinte écologique, par exemple, exprime toute une série de productions et de consommations en termes d'unités spatiales, c'est-à-dire en équivalents-hectares de terres de différentes natures nécessaires à la production des ressources ou des fonctions environnementales utilisées. Dans ce cas, l'espace est pris comme unité commune sans référence particulière à un territoire déterminé.

Cette forme d'intégration par les unités de mesure est différente de celle que nous avons constatée à propos des modèles récents d'économie spatiale dans le chapitre précédent et qui tire profit de ce que l'espace constitue le support commun aussi bien aux processus physico-biologiques, qu'à l'existence d'espèces végétales et animales et aux implantations et activités humaines pour lui faire jouer le rôle de référentiel permettant l'intégration de connaissances environnementales et socio-économiques.

L'existence de cette référence concrète ainsi que celle de modes de représentations offerts par les systèmes d'information géographique permet que les objets abstraits de l'économie, de l'écologie, de la sociologie, etc., soient transposés en objets concrets situés dans un espace-temps déterminé et symbolisés sur un support visuel par des signes ou des images aisément identifiables. C'est le rôle des systèmes d'information géographiques. Comme l'écrit Benko (1998), p. 94 :

« Les systèmes d'information géographique (SIG)...ont pour vocation principale de rassembler, au sein d'un outil unique, des données diverses mais localisées dans le même espace géographique, relatives à la fois à la Terre et à l'homme, à leurs interactions et à leurs évolutions respectives, quels que soient les domaines concernés : physiques, sociaux, économiques, écologiques, culturels. Ce rassemblement permet d'élaborer les synthèses indispensables à la prise de décision dans tous ces domaines, aussi bien dans les situations de crise que dans les évolutions à long termes ».

On sait que les SIG disposent de deux modes de représentation de l'espace : le mode « raster » et le mode « vectoriel ». En mode « raster », le territoire est représenté comme un damier, ou

plus exactement comme autant de damiers différents qu'il y a de propriétés du territoire auxquelles on s'intéresse (nature du sol ou du sous-sol, élévation, concentration d'un polluant, etc.). Les couleurs des rectangles qui forment chaque damier correspondent à la valeur du terrain pour cette propriété. La représentation vectorielle consiste à ajouter à ces damiers des vecteurs (points, lignes et polygones) représentant des cours d'eau, des voies de communication, des surfaces (lacs, bâtiments, etc.). A chaque type de vecteur correspond un plan. Ces différents plans peuvent s'empiler en couches successives et donner ainsi une représentation de plus en plus riche du territoire considéré. C'est grâce à cette superposition de plans successifs qu'il est possible d'intégrer des points de vue disciplinaires différents. En dehors du fait d'ajouter ou d'enlever des couches vectorielles, les SIG offrent aussi la possibilité de changer d'échelle, de « zoomer » sur l'image du territoire et ainsi, d'élargir ou de réduire la perspective. En effet, un territoire, à quelque niveau qu'on le considère, ne constitue jamais que la somme de ses parties si bien qu'il est toujours possible de reconstituer l'ensemble à partir du détail, quitte évidemment à laisser de côté, dans la représentation graphique, certains d'entre eux.

Cette vision concrète n'est pas seulement spatiale, elle est aussi et nécessairement temporelle. Les objets représentés sont situés dans l'espace **et** dans le temps. Il est même possible, dans certains cas, de reconstituer au moyen d'une animation leurs métamorphoses au cours du temps selon telle ou telle hypothèse, tel ou tel scénario. Ce qui, selon Coquillard et Hill (1997) permet :

- un gain en confiance de l'utilisateur du modèle qui peut le relier à sa connaissance du système réel et du problème à traiter ;
- un gain en compréhension du système ;
- un gain d'implication des experts du domaine du système, qui se montrent d'autant plus enthousiastes qu'ils ont la possibilité de paramétrer ou d'interagir par eux-même avec les modèles.

Par ailleurs, Coquillard et Hill insistent sur l'utilité de ces animations dans le cadre du processus de validation des modèles de simulation.

La comparaison de l'espace et du temps s'avère sur ce point éclairante. On pourrait penser, à première vue, que le temps devrait offrir les mêmes possibilités d'intégration des connaissances que l'espace. Or, cela ne semble pas être le cas. Qu'est-ce qui s'opposerait à la constitution de SIH (Systèmes d'Information Historique), le pendant chronologique des SIG ? Ceci, semble-t-il : l'espace se prête à la superposition et à l'agrégation des points de vue d'une façon qui n'a pas d'équivalent pour le temps. Alors qu'un territoire représenté dans une carte au 25.000ème se retrouve identique à lui-même à la constante d'échelle près dans une carte au 50.000ème ou 10.000ème etc., il n'en va pas de même avec le temps. Une vision de l'Europe en termes de millénaires sera toute différente d'une vision en termes de siècles, qui sera elle-même différente d'une analyse en termes d'années ou de décades. Le changement d'échelle chronologique induit ici un changement d'unités d'analyse. L'entité « Etat-nation », par exemple, n'a pas de sens à l'échelle du millénaire. A cette échelle, c'est soit de civilisation et de culture qu'il faut parler, soit de village ou de terroir. Toutes les entités socio-politiques intermédiaires ont une existence trop éphémère pour constituer des objets d'analyse pertinents en terme de temps long. Il y donc solution de continuité, au niveau historique, entre les échelles différentes. Ce n'est pas le cas au niveau de l'espace où le passage du local au global et du global au local correspond à un simple changement d'échelle. Le cinéma et la télévision exploitent volontiers cette propriété avec des longs zooms avant où l'on passe, sans solution perceptible de continuité, de la vision globale de la terre, à celle d'un continent, puis d'un pays,

puis d'un village ou d'une prairie jusqu'à pénétrer éventuellement dans un nid d'oiseau, un terrier, etc.

Par ailleurs, alors qu'une entité géographique peut avoir une signification indépendamment de toute référence chronologique précise, il n'en va pas de même pour une entité historique. On peut parler des Alpes, de l'océan Atlantique ou du Gulfstream en général, et une conversion sensée peut se dérouler à leur propos sans qu'il soit nécessaire de les situer dans le temps⁶⁰. Ce n'est pas le cas dans le domaine du temps. En fait, il n'y a pas d'entité chronologique à proprement parler. Parler du XIV^{ème} siècle en tant que tel n'a pas de sens si on ne précise pas en même temps une entité géo-politique ou culturelle. Il peut s'agir alors du « quattrocento », c'est-à-dire d'un XIV^{ème} siècle limité à une entité géographique (les cités-états italiennes) et à un point de vue particulier, celui de la culture et de l'art.

On peut donc dire que le temps n'a lui-même de signification que par rapport à une entité d'abord déterminée spatialement. On comprend mieux ainsi pourquoi le territoire, le sol, l'espace dans ses déterminations concrètes peut constituer ce facteur d'intégration des connaissances. C'est qu'il est toujours en même temps espace et temps, géographie et histoire à la fois et que sans cette référence spatiale, le temps lui-même resterait abstrait, dépourvu d'ancrage.

Il existe déjà des disciplines qui réalisent l'intégration de connaissances portant à la fois sur des phénomènes naturels et sur des phénomènes socio-économiques. On pense surtout à la géographie et à la « science régionale » (Benko, 1998). Ce n'est sans doute pas un hasard si toutes les deux ont l'espace au cœur de leur problématique. La « science régionale » constitue un modèle à bien des égards pour le développement d'analyses et de modèles en termes de développement durable. Sans renoncer à utiliser les outils les plus performants de la macro-économie « orthodoxe » (analyse coûts-bénéfices, matrices input-output, programmation linéaire, etc.), elle s'est affranchie de ce que Beck (2003) appelle le « nationalisme méthodologique » dont souffriraient, d'après lui, la plupart des sciences sociales en se dotant d'un objet d'étude spécifique, la région définie comme :

« une aire géographique constituant une entité qui permette, à la fois, la description des phénomènes naturels et humains, l'analyse des données socio-économiques et l'application d'une politique. Elle se fonde sur deux caractères principaux : homogénéité et intégration fonctionnelle et s'achève, à la fois, par le sentiment d'une solidarité vécue et par des relations d'interdépendance avec les autres espaces régionaux et avec l'espace national et international » (Lajugie *et al.* (1985), p. 15).

Cette définition montre que l'interdisciplinarité et l'interaction entre niveaux emboîtés sont inscrits dans le projet même de la discipline. Par ailleurs, elle est d'emblée orientée vers l'action (l'application d'une politique de développement). Loin de rejeter les acquis de la théorie économique, elle les met au service d'une vision littéralement « enracinée » de l'économie où les contraintes et les bénéfices de la localisation trouvent leur juste place au sein d'une théorie d'un développement régional. Il était tout naturel qu'elle accueille plus aisément et plus favorablement que d'autres la notion et l'exigence de développement durable.

⁶⁰ Même si, en réalité il existera néanmoins une référence temporelle implicite et même si, pour un historien, par exemple, les Alpes du XIX^{ème} siècle ne sont pas celles du XX^{ème} et se réfèrent à des systèmes économiques et sociaux et à des modes de vie complètement différents.

7.2.3 *Metamodèles et Sustainability Impact Assessment*

La nécessité d'une forme spécifique d'évaluation intégrée (*integrated assessment*) pour le développement durable se fait de plus en plus sentir. Il semble d'ailleurs qu'une discipline ou pratique nouvelle, appelée en anglais SIA (*Sustainability Impact Assessment*), soit en train de voir le jour⁶¹. Celle-ci se placera sous le signe d'une double intégration :

- intégration de l'évaluation en termes de développement durable *ex ante*, *ex nunc* et *ex post* dans la formation et la prise de décision politique, quels que soient le secteur et le niveau ;
- intégration des savoirs et des points de vue des différentes disciplines dans une appréciation globale et synthétique des effets à court, moyen et long terme des politiques publiques en termes de développement durable.

Comme on l'a montré ci-dessus, la forme la plus achevée d'intégration consiste en l'incorporation de modèles (ou de parties de modèles) disciplinaires, de structure et de nature souvent très différents, au sein d'un ensemble de niveau supérieur appelé « métamodèle ». Comme l'écrivent Rotmans et van Asselt : “The metamodel strategy is to be preferred in most cases, because it enables the inclusion of linkages, interactions and feedbacks at each possible level, which leads to a more advanced form of integration” (Rotmans and van Asselt, 2000).

Existe-t-il des classes de modèles plus aptes que d'autres à servir de base à ces métamodèles ? Il nous semble que l'étude menée ici répond partiellement à cette question dans la mesure où les critères retenus sont *a priori* encore plus pertinents pour des métamodèles intégrés du développement durable que pour des modèles plus spécialisés ou plus sectoriels. Seule l'importance relative de l'un ou l'autre critère peut s'en trouver modifiée ; ainsi, le critère de l'interdisciplinarité revêt-il, dans le cadre de l'élaboration de métamodèles, une importance plus cruciale encore. Il en va de même pour l'intégration des échelles temporelles. Cependant, le choix d'une méthodologie dépend aussi d'autres considérations. Par exemple, si l'évaluation doit s'effectuer essentiellement en terme de risque, on se tournera plus volontiers vers des modèles de type réseau bayésien. Par contre, si l'évaluation s'attache surtout à démêler l'écheveau complexe d'un entrecroisement de feedbacks positifs et négatifs accompagnés de délais et de non-linéarités, on se tournera plutôt vers une approche en termes de dynamique des systèmes. Pourquoi spécifiquement ces deux approches ?

Parce que chacune d'entre elles s'exprime en un langage transdisciplinaire, une sorte de *lingua franca* scientifique qui facilite la communication entre langages spécialisés. Dans le cas des réseaux bayésiens, cette *lingua franca* est la théorie (bayésienne) des probabilités ; dans celui de la dynamique des systèmes, la cybernétique et la théorie générale des systèmes. Chacun de ces langages transdisciplinaire s'articule autour d'un concept fondateur qui joue le rôle de principe « intégrateur ». Dans un cas, c'est le concept de probabilité, dans l'autre, celui de système. Mais, à la réflexion, il s'agit de bien davantage que de langages. La théorie des systèmes et la théorie des probabilités subjectives peuvent être décrites comme des métathéories. En ce qui concerne la théorie générale des systèmes (GST), elle a été clairement identifiée depuis longtemps par Bunge (1997) comme une métathéorie scientifique ou une ontologie scientifique. Quant à la théorie bayésienne (subjective) des probabilités, elle peut revendiquer le statut de métathéorie de la connaissance ou d'épistémologie scientifique. Les modèles multi-agents, pour intéressants et potentiellement féconds qu'ils soient, souffrent à cet

⁶¹ Cf. Kirkpatrick, C. and S. Mosedale, 2002, *European Governance Reform : The Role of Sustainability Impact Assessment*. Prepared for the EU-LDC International Conference on “Improving Global Governance for Development : Issues and Instruments”, 8-10 December, Chiang Mai, Thailand.

égard d'un handicap. Il n'existe pas encore de langage ou de métathéorie suffisamment développée et unifiée pour pouvoir parler dans les mêmes termes de n'importe quel type d'agent, indépendamment de leur nature ontologique. Alors que la théorie des systèmes permet de parler dans les mêmes termes d'objets physiques, biologiques, sociaux, culturels, etc., le vocabulaire des agents manque encore de cette universalité. A notre sens, l'apport de ce paradigme à la création de métamodèles de SIA serait beaucoup plus important si cette lacune était comblée. Peut-être s'agit-il là d'une piste de recherche prometteuse aussi bien pour la recherche fondamentale d'ailleurs que pour l'aide à la décision.

Il n'est peut-être pas indifférent non plus pour notre propos que ces deux classes de modèles, outre un formalisme mathématique spécifique, se prêtent à une représentation graphique étroitement liée à ce formalisme. Dans le cas des réseaux bayésiens, le lien entre le modèle graphique et le modèle mathématique est particulièrement étroit puisque l'algorithme de propagation de l'inférence tire parti des propriétés topologiques du graphe orienté qui exprime les relations de dépendance et d'indépendance conditionnelle entre les variables. Cette propriété renforce un langage universel par un autre langage universel⁶² : celui des images, des schémas, des graphes. Dans le cas de la théorie des systèmes, du moins dans l'interprétation qu'en donne la « dynamique des systèmes », chaque type de variable (niveaux, taux, auxiliaires, constantes, fonctions de table, etc.) est représenté par un symbole spécifique si bien que la lecture du graphe du modèle donne déjà un aperçu assez complet de sa structure mathématique. La possibilité de construire graphiquement un modèle de réseau bayésien ou de dynamique des systèmes, sans devoir nécessairement entrer dans les arcanes des formulations mathématiques sous-jacentes, constitue évidemment un atout lorsqu'il s'agit de faire collaborer des scientifiques de disciplines différentes qui ont chacune leur outils mathématiques propres, quand elles en ont à leur disposition.

Avec les modèles multi-agents, les possibilités de représentation graphique sont encore plus riches (proches mêmes de ce qu'offrent les SIG). Cependant, il faudrait ici aussi procéder à une forme de codification des modes de représentation des univers dans lesquels peuvent se mouvoir les agents. Que ce soit pour désigner les agents et leurs modes de comportement et d'interaction ou pour caractériser les univers dans lesquels ils se meuvent, un important travail d'unification et de clarification des concepts reste à accomplir.

⁶² Il convient d'être prudent dans l'usage du qualificatif "universel" à propos d'images et de graphiques. En fait, la perception du sens de ces éléments iconiques est très variables d'une culture à l'autre. Lorsqu'on parle ici d'universalité, on fait référence à l'univers restreint de la "cite savante".

Références bibliographiques

- Alberti, M. (1999), « Modelling the Urban Ecosystem. A Conceptual Framework », *Environnement and Planning B*, 26.
- Alberti, M, P.Waddell (2000), “An Integrated Urban Development and Ecological Simulation Model”, *Integrated Assessment*.
- Alonso, W. (1964), *Location and Land Use*, Cambridge : Harvard University Press.
- Anas, A., Arnott,R. and Small, K.A. (1998), “Urban Spatial Structure”, *Journal of Economic Literature*, Vol XXXVI, 1426-1464.
- Arrow K. Cropper M. Eads G., Hahn R., Lave L., Noll R., Portney P., Russel M., Schmalensee R., Smith K., Stavins R. (1996), “Is there a role for benefit-cost analysis in environmental, health and safety regulation?”, *Science*, 272, April, pp. 221-222.
- Artus P., Deleau M., Malgrange P. (1986), *Modélisation macroéconomique*, Paris, Economica.
- Atkinson G. (2000), “Sustainable development and policy”, in : Helm D. (ed), *Environmental Policy : Objectives, Instruments and Implementation*, Oxford University Press, pp 29-47.
- Beck U. (2003), *Pouvoir et contre-pouvoir à l'ère de la mondialisation*, Paris, Alto-Aubier.
- Benko G. (1998), *La science régionale*, Paris, PUF.
- Böhringer Ch. (1998), “The synthesis of bottom-up and top-down in energy policy modelling”, *Energy Economics*, Vol. 20, pp. 233-248.
- Boulanger P-M., Bréchet Th. (2001), “Overview, classification and characterisation of scientific tools for sustainable development decision-making”, EC-OSTC workshop, 28-29 November, Brussels.
- Bousquet, F., Bakam, I., Proton, H., Le Page, C. (1998), Cormas : Common-Pool Resources and Multi-Agent Systems. *Lecture Notes in Artificial Intelligence* 1416, 826-837.
- Bousquet F., Barreteau O., Le Page C., Mullon C., Weber J. (1999), “An environmental modelling approach, the use of multi-agents simulations”, in : F.Blasco, A.Weill (Eds.), *Advances in Environmental and Ecological Modelling*, Elsevier, Paris, pp 113-122.
- Bunge M. (1981), “Development Indicators”, *Social Indicators Research*, 9, pp. 369-385.
- Bunge M. (1985), *Treatise in Basic Philosophy*, Vol.7, Reidel, Dordrecht.
- Bunge M. (1977), “The GST challenge to the classical philosophies of sciences”, *Intern. J. General Systems*, 4, pp. 29-37.
- Bureau fédéral du Plan (2002), *Un pas vers un développement durable ? – Rapport fédéral sur le développement durable 2002*, Bruxelles.

Butter F.A.G. (1998), "Macroeconomic modelling for sustainable development", in : Van den Bergh J.C.J.M., Hofkes M.W. (eds.), *Theory and implementation of economic models for sustainable development*, Kluwer Academic Publishers.

Coquillard P. et Hill D.R.C., (1997), *Modélisation et simulation d'écosystèmes*, Paris, Milan, Barcelone : Masson.

Dale C.J. (1986), *Introduction to Database Systems*, Addison Wesley.

D'Aquino, P., C.Le Page, F.Bousquet et A.Bah (2003), "Using Self-Designed Role-Playing Games and a Multi-Agents System to Empower a Local Decision-Making Process for land Use Management : The SelfCormas Experiment in Senegal", *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, Vol 6, N°3, 1-24.

Dasgupta P., Mäler K.G. (1995), "Poverty, institutions and the Environmental-Resource Base" in: *Handbook of Development Economics*, eds J. Berhrman and T.N. Srinivasan, Amsterdam, North-Holland.

Dasgupta P., Mäler K.G. (2001), "Wealth as Criterion for Sustainable Development", Discussion Paper 139, Beijer Institute of Ecological, Economics, Stockholm.

De la Barra, T. (1989), *Integrated Land Use and Transport Modelling*, Cambridge : Cambridge University Press.

Deutsch, K. W. (1963), *The Nerves of Government: Models of Political Communication and Control*, New York: Free Press.

Ducroux A.M. (ed.) (2002), *Les Nouveaux Utopistes du Développement Durable*, Editions Autrement, Collection Mutations, Paris.

European Environmental Agency (2000), "Cloudy Crystal Balls – An Assessment of Recent European and Global Scenarios Studies and Models", *Environmental Issues Series*, n° 17.

European Union Commission (1998), *SPARTACUS : System for Planning and Research in Towns and Cities for Urban Sustainability*, DGXII, Brussels.

Ekins P. (2000), "Costs, benefits and sustainability in decision-making, with special reference to global warming", *Int. J. Sustainable Development*, Vol. 3, n° 4, pp 315-333.

Epstein J.M. Axtell R. (1996), *Growing Artificial Societies. Social Science from the Bottom-Up*, MIT Press, Cambridge Mass., Brookings Institution Press, Washington D.C.

Fankhauser S., McCoy D. (1997), "Modelling the economic consequences of environmental policies", in: Folmer H., Gabel H.L., Opschoor H. (eds), *Principles of Environmental and Resource Economics*, Edward Elgar, pp. 253-275.

Forrester J.W. (1968), *Principles of Systems*, MIT Press, Cambridge, Mass.

Forrester J.W. (1969), *Urban Dynamics*, MIT Press, Cambridge, Mass.

Forrester J.W. (1971), *World Dynamics*, Wright-Allen, Cambridge Mass.

French S. (1988), *Decision Theory. An introduction to the Mathematics of Rationality*, Ellis Horwood Limited, Chichester.

Funtowicz S.O., Ravetz J.R. (1990), *Uncertainty and Quality in Science for Policy*, Kluwer Academic Publishers.

Gallo G. (2003), "Operations research and ethics : responsibility, sharing and cooperation", *European Journal of Operational Research*, forthcoming.

Godard O. (1993), "Le developpement durable", in : Commissariat général du Plan, *L'économie face à l'écologie*, Editions La Découverte, Paris, pp 132-143.

Handmer J.W., Norton T.W., Dovers S.R., (eds.) (2001), *Ecology, Uncertainty and Policy*, Prentice Hall, London.

Hisschemöller M., Tol R., Vellinga P. (2001), "The relevance of participatory approaches in integrated environmental assessment", *Integrated Assessment*, n. 2, pp 57-72.

Hofkes W. (1996), "Modelling sustainable development: An economy-ecology integrated model", *Economic Modelling*, Vol. 13, n° 3, pp. 333-353.

Holland J.H. (1995), *Hidden Order. How Adaptation Build Complexity*, Helix Books, Addison-Wesley.

Hordijk L., Kroeze C. (1997), "Integrated assessment models for acid rain", *European Journal of Operational Research*, n. 102, pp 405-417.

Howarth R.B. (1997), "Sustainability as opportunity", *Land Economics*, 73(4), pp. 569-579.

IPCC (1996), *Climate Change 1995 : Economic and Social Dimensions*, Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the IPCC, Cambridge University Press.

IPCC (2001), *Climate Change 2001 : Mitigation*, Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the IPCC, Cambridge University Press.

IPTS (2001), "Conference conclusions : towards a new alliance between science, citizens and society", IPTS Report, Vol. 55, Special Issue: Science and Governance in a Knowledge Society, Conference II.

Janssen, M.A. (2003), "Predicting Change or Assessing Resilience of Social-Ecological Systems ? Challenge and Opportunities for Sustainability Impact Assessment Modelling", Workshop on "Sustainability Impact Assessment of Trade Agreements and New Approaches to Governance", Louvain-La-Neuve, Mars 2003.

Lautso, K., K. Spiekermann , Wegener, M. (2002), "Modelling Policies for Urban Sustainability", Paper presented at the 42nd Congress of the European Regional Science Association (ERSA), Dortmund, 27-31 August 2002.

Le Page C., F.Bousquet, I. Bakam, A. Bah, C. Baron, *CORMAS : A multiagent simulation toolkit to model natural and social dynamics at multiple scales*, CIRAD.

Jorgenson D.W., Wilcoxon P.J. (1993), "Reducing US carbon emissions: an econometric general equilibrium assessment", *Resource and Energy Economics*, Vol. 15, pp. 7-25.

Koopmans C., te Velde D.W. (2001), "Bridging the energy efficiency gap: using bottom-up information in a top-down energy demand model", *Energy Economics*, Vol. 23, pp. 57-75.

Ladrière, J., Préface à Apostel (2000).

Lajugie, J., Delfaud, P., Lacour, C. (1985), *Espace regional et aménagement du territoire*, Paris, Dalloz. Cité par Benko, G. (1998), *La science régionale*, Paris, PUF.

Maxwell T., Costanza R. (1994), "Spatial Ecosystem Modelling in a Distributed Computational Environment", in Jeroen C.J.M. van den Bergh and Jan van der Straaten, Eds. *Toward Sustainable Development*, International Society for Ecological Economics, Island Press, Washington, D.C., pp. 111-139.

Meadows Dennis L. *et al.* (1974), *Dynamics of Growth in a Finite World*, Wright-Allen, Cambridge, Mass.

Meadows Donnella *et al.* (1992), *Beyond The Limits, Confronting Global Collapse, Envisioning a Sustainable Future*, Chelsea Green Pub. Company, Post Mills, Vermont.

Mezarovic M., Pestel E. (1976), *Mankind at the Turning Point*, Signet Book, New American Library, New York.

Morgan M.G., Dowlatabadi H. (1996), "Learning from integrated assessment of climate change", *Climatic Change*, n. 34, pp 337-368.

Moffatt I. et Hanley N. (2001), "Modelling sustainable development: systems dynamic and input-output approaches", *Environmental Modelling & Software*, Vol. 16, n° 6, 2001, pp. 545-557.

Moffatt I, Hanley N. et Wilson M. (2001), *Measuring and modelling sustainable development*, Parthenon Publishing.

Munasinghe M. (2001), "Sustainable development and climate change : applying the sustainomics transdisciplinarity meta-framework", *Int. J. Global Environmental Issues*, Vol. 1, n° 1, pp 13-55.

Muth, R.F. (1969), *Cities and Housing*, Chicago : University of Chicago Press.

Naill Roger F. (1992), "A system dynamics model for national energy policy planning", *System Dynamics Review*, Vol. 8, N°1, 1-21.

OECD (2001), *Sustainable development : critical issues*, Paris.

Oliveira C. et Henggeler Antunes C. (2003), "A multiple objective model to deal with economy-energy-environment interactions", *European Journal of Operational Research*, forthcoming.

Onishi A. (2002), "FUGI global modelling system: integrated global model for sustainable development", *Journal of Policy Modeling*, Vol. 24, 2002, pp. 561-590.

Page T. (1997), "On the problem of achieving efficiency and equity, intergenerationally", *Land Economics*, 73(4), pp. 580-596.

Paruccini M., Haarstrup P., Bain D. (1997), "Systèmes d'aide à la décision au service des responsables de l'action publique", *IPTS Report*, n° 14, pp 33-41.

Perrings C. (1991), "Reserved Rationality and the Precautionary Principle : Technological Change, Time and Uncertainty in Environment Decision-Making", in : Costanza, R. (ed.),

Ecological Economics : The science and management of sustainability, Columbia University Press, New York.

Randers Jorgen (2000), "From limits to growth to sustainable development or SD (sustainable development) in a SD (system dynamics) perspective", *System Dynamics Review*, Vol. 16, N°3, 213-225.

Rotmans J., van Asselt M.B.A. (2001), "Uncertainty in integrated assessment modelling : a labyrinthic path" *Integrated Assessment*, n° 2, pp. 43-55.

Safonov, P. et W. Hecq (2000), Dynamic ecological-economical modelling for regional planning : A case study of environmental impacts of mobility induced by major policy options in the Brussels-Capital Region, CEESE, Bruxelles.

Svedin U. (2001), "Sustainable development and R&D policy, the European Context", EC-OSTC workshop, 28-29 November, Brussels.

Van den Bergh J.C.J.M. et Nijkamp P. (1991), "Operationalizing sustainable development: dynamic ecological economic models", *Ecological Economics*, Volume 4, n° 1, pp. 11-33.

Van den Bergh J.C.J.M., Hokes M.W. (1998), "A survey of economic modelling of sustainable development", in : van den Bergh, J.C.J.M., Hokes, M.W. (eds), *Theory and Implementation of Economic Models for Sustainable Development*, Kluwer Academic Publishers, pp 11-37.

Van der Vorst R., Grafé-Buckens A., Sheate W.R. (1999), "A systemic framework for environmental decision-making", *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*, Vol. 1, n° 1, pp 1-26.

Waddell, P, "Introduction to Urban Simulation: Design and Development of Operational Models", www.urbansim.org/papers/waddell-ulfarsson-ht-IntroUrbanSimul.pdf.

Waddell, P. (2002), "UrbanSim : Modelling Urban Development for Land Use, Transportation and Environmental Planning", *Journal of the American Planning Association*, 68, N°3, 297-314.

Wegener, M. (1998), « Land Use and Transport Model Integration : Progress and Future Directions », Portland International Congress on Integrating Land Use and Transport Models.

Walliser B. (1977), *Systèmes et Modèles*, Editions du Seuil, Paris.

Willinger M. (1997), "La modélisation du développement durable : approches économiques", in : Blasco F. (ed.) *Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement*, CNRS, Elsevier.

ANNEXE 1. Les termes de référence du projet de recherche

INTITULÉ

Modélisation et aide à la décision pour un développement durable : pistes de recherche

THEME

Trop souvent, le développement durable est abordé avec des instruments de modélisation et d'aide à la décision préexistants construits initialement pour une décision économique "classique" (investissement, choix technologiques...), inspirés d'une épistémologie et d'une tradition scientifique qui nous paraît souvent inadéquate pour les raisons suivantes :

- L'approche qui les fonde est fondamentalement uni- ou mono-disciplinaire alors que le développement durable exige une approche inter- (ou trans-) disciplinaire afin d'appréhender les relations entre l'homme et son milieu, mais aussi pour rendre compte de la complexité de la sphère biophysique et de la non moins grande complexité de la sphère "anthropique" dans ses dimensions culturelle, sociologique, démographique, etc...
- Le point de vue adopté est trop souvent "unigénérationnel", alors que le développement durable consiste précisément à évaluer le mieux possible l'impact de nos décisions actuelles sur les possibilités de bien-être des générations futures ; les approches traditionnelles font soit tout simplement l'impasse sur les générations futures, soit réduisent celles-ci à une copie conforme des générations actuelles, obéissant, par exemple, à une fonction d'utilité identique à la nôtre simplement affectée d'un taux d'actualisation.
- Une part insuffisante y est faite à l'aléatoire, à l'incertain, principalement en ce qui concerne le savoir scientifique lui-même. Les données scientifiques y sont rarement présentes sous forme de distribution de probabilité alors que bien souvent la communauté scientifique est extrêmement divisée sur les valeurs réelles de très nombreux paramètres. En général, le domaine de l'incertain et de l'aléatoire est réservé au futur et aux décisions humaines alors qu'il imprègne de bout en bout nos connaissances actuelles, y compris du monde biophysique.
- La prise de décision y est envisagée majoritairement au niveau de l'État-Nation alors que le développement durable suppose une implication beaucoup plus importante des pouvoirs locaux, régionaux et supra-nationaux. Souvent, d'ailleurs, le niveau de décision est considéré comme une donnée exogène et fixe, comme un élément de la solution alors même qu'il fait partie du problème.

Des modèles efficaces pour le développement durable devraient donc réunir les conditions suivantes: être interdisciplinaires, pouvoir adopter un horizon temporel de moyen et long terme et/ou modéliser explicitement les générations, prendre en compte l'aléatoire et l'incertain, déterminer le niveau optimum de décision et incorporer les variables de commande pertinentes à ce niveau.

En règle générale, les approches classiques remplissent insuffisamment ces conditions. En revanche, des approches nouvelles émergent qui sont plus susceptibles, nous semble-t-il, de les réunir. Cependant, elles sont encore généralement peu pratiquées en Belgique et demandent à être soigneusement évaluées avant d'en suggérer une plus grande utilisation.

Ce projet s'inscrit dans le cadre de l'article 35 de l'Agenda 21 qui invite à "mettre au point et appliquer de nouveaux outils analytiques et prévisionnels permettant d'étudier avec plus de précision l'influence croissante de l'intervention de l'homme (...) et des tendances démographiques sur les systèmes naturels de la Terre, et de mesurer les effets et les conséquences de cette intervention et de cette dynamique".

Cet article énonce également la nécessité "d'appuyer la mise au point de nouveaux systèmes et techniques simples à utiliser et permettant de coordonner les processus multidisciplinaires - physiques, chimiques, biologiques et socio-humains - qui fournissent ensuite des informations et des connaissances aux décideurs et au grand public", ce qui constitue la motivation fondamentale de ce projet.

OBJECTIFS

L'objectif du projet est d'identifier les approches susceptibles de renouveler la pratique de l'aide à la décision en matière de développement durable dans notre pays, ce qui correspond à deux des objectifs assignés aux Actions de support, à savoir :

- la sélection, la confrontation et l'intégration des connaissances scientifiques acquises dans divers domaines en matière de développement durable ;
- la promotion active de la communication et des échanges auprès des utilisateurs potentiels, à la fois en tant que scientifiques, responsables politiques ou autres.

La méthodologie est articulée autour de trois leviers :

- la nécessité d'une modélisation, pas nécessairement quantitative mais la plus rigoureuse possible afin de garantir l'objectivité et la reproductibilité des résultats ;
- la recherche des niveaux les plus adéquats de décision et l'intégration des variables de commande correspondant à ces différents niveaux dans la modélisation ;
- le tout au service d'une vision interdisciplinaire, intergénérationnelle et non-déterministe du développement.

Une attention particulière sera portée, tout au long du projet, au dialogue avec les praticiens, c'est-à-dire à la fois avec les scientifiques en charge de modèles et les utilisateurs des résultats de ces modèles. Ce dialogue constituera le fil directeur du projet ; pour délimiter le champ d'exploration, deux domaines de recherche seront sélectionnés et fourniront un terrain de mise en opérationnalité des travaux théoriques.

ARTICLE 1: TÂCHES

1.1 Les tâches spécifiques du PROJET sont les suivantes:

Quatre étapes peuvent être distinguées pour mener à bien ce projet :

1. Mise en place du projet : cette étape préliminaire consistera à choisir, à l'aide du Comité d'accompagnement mis sur pied par les SSTC, les deux problématiques permettant d'illustrer les travaux théoriques ainsi que les différentes personnes à contacter pour mener à bien les réflexions méthodologiques.
2. Analyse de la littérature : une analyse critique des approches potentiellement exploitables est nécessaire en mettant l'accent sur celles qui offrent la meilleure capacité à appréhender les questions sous leur dimension interdisciplinaire. Le défi est d'identifier les approches les plus

porteuses en terme d'avancées potentielles vers l'interdisciplinarité et l'intergénérationnel ; cette étape doit mettre en évidence les limites des approches existantes et explorer le plus largement possible (dans l'espace des axes définis précédemment) les approches alternatives disponibles, leurs forces et leurs faiblesses, et surtout leur opérationnalité pour l'aide à la décision. Comme précisé précédemment, les facteurs communs recherchés sont la capacité à appréhender les différents niveaux de prise de décision, l'interdisciplinarité et le caractère intergénérationnel.

3. Etudes de cas : le tour de la littérature académique et des études appliquées effectué, il est intéressant d'aller voir du côté des producteurs et des utilisateurs d'outils d'aide à la décision : quelle est leur vision des défis posés par le développement durable ? Estiment-ils que leurs outils sont correctement/suffisamment exploités ? Estiment-ils que les outils qu'on leur offre sont adaptés, fiables, compréhensibles ? Comment, concrètement, dans leur domaine, faire un pas vers l'interdisciplinarité ? Une série d'entretiens permettra de rencontrer les acteurs impliqués sur base des résultats de la première partie du projet et de leur pratique personnelle. Deux problématiques seront considérées, parmi, par exemple la mobilité, l'eau, la pauvreté et l'exclusion, l'énergie, l'aménagement du territoire, les déchets...
4. Synthèse et conclusions : ces deux étapes doivent faire l'objet d'une synthèse permettant la mise en évidence de conclusions sur les outils existants et de pistes pour les outils futurs : quelles sont les limites intrinsèques aux outils existants par rapport à la question du développement durable, quelles pistes la science actuelle ouvre-t-elle et lesquelles méritent d'être explorées ? Cette étape a pour mission de synthétiser toute la matière mise en évidence dans le projet de manière à contribuer efficacement à la réflexion sur le développement des futurs outils d'aide à la décision en matière de développement durable. En vue d'une communication efficace des résultats pour l'aide à la prise de décision, une synthèse non-technique devra également être rédigée.

Sur base de la littérature analysée et des entretiens avec les experts, le projet fournira :

- Une synthèse et analyse des outils scientifiques disponibles permettant une meilleure adéquation des outils d'aide à la décision à la question du développement durable (approche typologique) ;
- Une grille d'analyse des caractéristiques-clés du développement durable et des outils scientifiques susceptibles de les appréhender (approche synoptique) ;
- Une identification des pistes les plus prometteuses en matière de recherche appliquée pour l'aide à la décision (approche prospective).

ANNEXE 2. Le formulaire distribué lors de la Table ronde

NOM :

Institution :

Vous participez au processus de décision dans le domaine énergétique en tant que modélisateurs ou utilisateurs de résultats de modèles.

Pour chacun des cinq critères suivants:

- a. Pensez-vous que l'exigence de développement durable implique que ce critère soit davantage pris en considération ?
- b. En tant que développeur de modèle ou en tant qu'utilisateur, comment le prenez-vous en compte et/ou comment envisageriez-vous de le faire à l'avenir ?

Critère 1 : interdisciplinarité

a.....
b.....

Critère 2 : intergénérationnalité

a.....
b.....

Critère 3 : risque et incertitude

a.....
b.....

Critère 4 : participation des parties prenantes

a.....
b.....

