



HAL
open science

Inventur, Inventaire des modèles du champ urbain

Daniel Siret

► **To cite this version:**

| Daniel Siret. Inventur, Inventaire des modèles du champ urbain. 1999. halshs-00755402

HAL Id: halshs-00755402

<https://shs.hal.science/halshs-00755402v1>

Submitted on 21 Nov 2012

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

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

INVENTUR

Inventaire des modèles du champ urbain

Éléments d'analyse des modèles inventoriés

Daniel Siret

Laboratoire CERMA
UMR CNRS 1563 / FR CNRS 73

inventur@cerma.archi.fr
<http://www.cerma.archi.fr/inventur/inventur.html>

Novembre 1999

INVENTUR

Remerciements

A Francis Yguel, promoteur de cette action dans ses fonctions au Projet-Ville du CNRS, pour ses encouragements et ses conseils toujours efficaces, en mer calme comme dans la tempête.

A Denise Pumain et Jean-Pierre Péneau, pour leur support et la confiance qu'ils ont bien voulu nous accorder.

A Isidore Boursier-Mougenot, pour son enthousiaste et dynamique participation à la préparation et au déroulement du projet.

A Marie-Laure Nivet, Marie-Joelle Antoine, Franck Raymond et Martine Chazelas pour leurs conseils éclairés et leur aide dans la préparation de cette action.

A tous les rédacteurs du questionnaire, pour la qualité de leurs contributions sans lesquelles naturellement rien de ce qui suit n'aurait pu être fait, ainsi que pour leur patience et leur indulgence quant aux difficultés parfois rencontrées dans le recensement des modèles.

A Jean Bouinot, Dominique Peeters, Pierre-Henri Derycke, Léna Sanders, Isabelle Thomas, Guy Cohen, Marc Lebourges, Fabien Laurent, Charles Raux, Bernard Brémond, Daniel Boissier, Patrice-G. Mestayer, Jean-Dominique Polack, François Laurent, Albert Dupagne, Christian Sacré, Gilbert Mounier, Didier Graillot, Christiane Weber, Lucien Wald, Patrick Le Quéré, Pierre Frankhauser, Michel Florenzano, Jacques Zoller et Richard Topol, pour leur amicale participation aux séminaires mis en oeuvre autour de cette action.

A celles et ceux qui ont manifesté de l'intérêt pour ce projet et participé directement ou indirectement à son déroulement.

Sommaire

1. Introduction	4
1.1 Le projet Inventur.....	5
1.2 Bilan général	11
1.3 Analyse des modèles.....	14
2. Etat des problématiques actuelles.....	23
2.1 Domaines et thèmes.....	24
2.2 Évolution temporelle	41
2.3 Échelles et dimensions.....	47
3. Motivations des auteurs	57
3.1 Origine des modèles.....	58
3.2 Objectifs et problématique.....	63
3.3 Public visé, diffusion du modèle	70
4. Capacités et limites opérationnelles des modèles.....	79
4.1 Opérationnalité et utilisabilité	80
4.2 Mise en oeuvre.....	92
4.3 Validation et documentation.....	104
5. Aspects scientifiques.....	116
5.1 Données et résultats	117
5.2 Concepts transversaux.....	127
5.3 Hypothèses et méthodes.....	146
6. Conclusion générale et éléments de discussion.....	155

1.

Introduction

1.1 Le projet Inventur

Le projet Inventur (contraction de *Inventaire* et *Urbain*) a été initié dans le cadre d'une action du CNRS intitulée « Gestion de modèles et de connaissances, application à la ville ». Il vise la réalisation d'un inventaire et d'une analyse des modèles existant actuellement dans le champ urbain, tous domaines confondus. Ce travail a été mené en partenariat entre l'équipe PARIS dirigée par D. Pumain et la Fédération de recherche 73 du CNRS dirigée par J-P. Péneau. L'inventaire lui-même est considéré comme achevé. L'analyse des modèles recensés fait l'objet du présent document.

Compte tenu de la variété des recherches ayant trait à la ville, ainsi que de la polysémie des termes utilisés, une définition restrictive de la notion de modèle a été mise en place. Ainsi, un modèle susceptible de figurer à l'inventaire est défini comme « un outil d'intelligibilité, développé à partir d'une formalisation logico-mathématique, suivant des hypothèses strictement énoncées, et pour lequel un travail de validation a été entrepris, permettant *in fine* de produire des connaissances sur un ou plusieurs phénomènes observables dans un champ donné ».

L'inventaire s'attache donc à décrire des modèles présentant une certaine opérationnalité. Ce sont avant tout des outils logiciels, développés à partir d'un ou plusieurs modèles théoriques, et ayant vocation à être utilisés hors laboratoire. Sont écartés a priori les modèles qui ne relèveraient que de simples descriptions ou d'expérimentations numériques n'ayant pas fait l'objet d'un travail de validation.

Parallèlement, le champ urbain est considéré comme l'ensemble des phénomènes naturels et anthropiques observables au niveau de fragments urbains significatifs, d'entités urbaines globales ou de systèmes de villes dans un territoire. Sont écartées a priori les échelles extrêmes, trop proches des entités architecturales d'une part, ou des grandes échelles géographiques d'autre part. Ces limites sont cependant laissées à l'appréciation des experts décrivant les modèles.

Les modèles concernés par l'inventaire s'appliquent indifféremment à tout phénomène du champ urbain. A titre indicatif, huit grands domaines et 44 champs relatifs ont été proposés (nous y reviendrons).

En pratique, le projet s'est appuyé sur un questionnaire interdisciplinaire de description des modèles et sur quatre séminaires thématiques d'analyse et de comparaison des modèles. La réalisation et la diffusion du questionnaire ont constitué une part importante du travail, les problèmes posés provenant en particulier de l'éclatement géographique et disciplinaire des producteurs et utilisateurs de modèles. L'identification de ces derniers a été réalisée à partir de plusieurs bases de données des chercheurs du champ urbain. Les laboratoires associés au CNRS ont été une cible privilégiée. Le publipostage qui en a résulté en septembre 1998 a eu un caractère national.

La diffusion du questionnaire a fait l'objet d'une expérience novatrice, du moins pour les partenaires du projet. Plutôt que de proposer ce questionnaire sous sa forme matérielle (près de 20 pages sur un support papier), il a été décidé d'en constituer une version électronique accessible via le réseau Internet, au travers des pages Web dédiées à l'action, accueillies sur le site du laboratoire CERMA : www.cerma.archi.fr/inventur/inventur.html

Le questionnaire lui-même a fait l'objet d'une élaboration en plusieurs phases. La structure finalement arrêtée est reproduite *in extenso* ci-après.

• Le questionnaire de description des modèles

La structure du questionnaire Inventur est reproduite dans le tableau ci-dessous. La première colonne donne le numéro des champs, de 1 à 98. La colonne suivante spécifie le type du champ : *t* pour texte, *l* pour ligne (texte sans saut de ligne), *r* pour les champs de type choix unique parmi *n* (dits « boutons radios »), *c* pour les champs de type choix multiple parmi *n* (dits « cases à cocher »). La troisième colonne donne l'intitulé du champ qui, dans le questionnaire effectivement diffusé, est en général précisé par un sous-titre ou un bref commentaire. Pour les champs de type *r* et *c*, les colonnes suivantes donnent les numéros et les intitulés des différents choix possibles.

Dans le questionnaire effectif, cette liste de champs est organisée en trois parties principales définies comme suit :

1. La **présentation générale du modèle** (champs 1 à 48 inclus), comprenant les champs d'identification du modèle et de ses auteurs, les domaines et thèmes d'application du modèle, les phénomènes étudiés, les objectifs et l'opérationnalité du modèle, ses échelles et dimensions dans le champ urbain, sa famille, ses antécédents et sa filiation éventuelle.
2. Une **description scientifique et technique** du modèle (champs 49 à 87 inclus), articulée autour des problèmes propres à la modélisation (problématique et hypothèses, formalisation et construction du modèle, méthodes de résolution, sensibilité, validation et limites), de la nature des données et résultats, puis des questions pratiques de mise en oeuvre (matériel, système et code, temps de mise en oeuvre, documentation et utilisation).
3. Une **description libre** du modèle (champs 88 à 90 inclus), comprenant un abstract, les publications relatives au modèle ainsi que d'autres commentaires éventuels.

Une quatrième et dernière partie propose au rédacteur du questionnaire de mieux s'identifier par rapport au modèle et d'apporter un point de vue sur celui-ci (champs 91 à 98). Elle est facultative.

01	l	Nom du modèle		
02	l	Année de création du modèle		
03	l	Numéro de version actuel		
04	r	Le modèle existe-t-il sous la forme d'un logiciel diffusable ?	1	Oui
			2	Non
05	r	Si oui, est-il libre de droits ou soumis à une licence ?	1	Libre de droits
			2	Soumis à une licence
06	t	Précisions sur les conditions d'utilisation		
07	t	Identité et coordonnées des auteurs		
08	r	Statut des auteurs	1	Recherche
			2	Organisme institutionnel
			3	Privé
09	l	Nom de la personne à contacter préférentiellement		
10	l	E-mail de la personne à contacter préférentiellement		
11	l	Lien Web de la personne à contacter préférentiellement		
12	c	Champs de la géographie et de la dynamique spatiale concernés par le modèle	1	Dynamique spatiale intra-urbaine
			2	Mobilité quotidienne
			3	Choix résidentiels
			4	Utilisation du sol
			5	Dynamique des systèmes de villes
			6	Systèmes d'information géographique
			7	Géomarketing
13	l	Autre champ de la géographie et de la dynamique spatiale concerné par le modèle		

14	c	Champs de l'économie et de la gestion urbaine concernés par le modèle	1 2 3 4	Marché foncier et immobilier Marché du travail Gestion urbaine Localisations des activités
15	l	Autre champ de l'économie et de la gestion urbaine concerné par le modèle		
16	c	Champs de la sociologie concernés par le modèle	1 2 3	Réseaux sociaux Intégration / Exclusion Criminalité / Violence
17	l	Autre champ de la sociologie concerné par le modèle		
18	c	Champs des transports concernés par le modèle	1 2 3 4 5 6	Demande de transport Choix modal Logistique Interconnexion Réseaux de transport intra-urbain Réseaux de transport inter-urbain
19	l	Autre champ des transports concerné par le modèle		
20	c	Champs des réseaux techniques concernés par le modèle	1 2 3 4 5 6	Eau / Eaux usées / Assainissement Électricité Réseaux hertziens / Télécommunications Réseaux de chaleur Réseaux de transport de gaz Réseaux de collecte de déchets urbains
21	l	Autre champ des réseaux techniques concerné par le modèle		
22	c	Champs de la physique urbaine concernés par le modèle	1 2 3 4 5 6 7 8	Climatologie urbaine Aérodynamique / Pollution de l'air Hydrologie / Pollution de l'eau Sols / Mécanique des sols / Pollution des sols Thermique et énergétique urbaine Acoustique urbaine Éclairage naturel et artificiel Végétation
23	l	Autre champ de la physique urbaine concerné par le modèle		
24	c	Champs des risques et cindyniques concernés par le modèle	1 2 3	Risques naturels Risques épidémiologiques ou toxicologiques Risques industriels
25	l	Autre champ des risques et cindyniques concerné par le modèle		
26	c	Champs de la morphologie urbaine concernés par le modèle	1 2 3 4 5 6 7	Modèles de terrain Tissus urbains / Architecture urbaine Urbanisme / Développement urbain Modèles fractals Télé-détection / Radar Photogrammétrie / Reconstruction 3D Imagerie urbaine
27	l	Autre champ de la morphologie urbaine concerné par le modèle		
28	t	Autres domaines concernés par le modèle		
29	t	Autres champs concernés par le modèle		
30	t	Les phénomènes que le modèle permet de simuler, d'évaluer		
31	c	Les objectifs du projet de modélisation de ces phénomènes	1 2 3	L'analyse et la compréhension du(es) phénomène(s) La simulation et l'expérimentation La prédiction ou l'aide à la décision
32	t	Précisions sur les objectifs du projet de modélisation		
33	r	S'agit-il plutôt d'un modèle de connaissance ou d'un modèle de fonctionnement	1 2	Modèle de connaissance Modèle de fonctionnement
34	t	Précisions sur le point de vue du rédacteur concernant l'aspect modèle de connaissance / modèle de fonctionnement		

35	r	Par rapport à ses objectifs, le modèle est opérationnel ?	1 2	Oui Non
36	t	Précisions sur les capacités et les limites opérationnelles du modèle		
37	c	Échelles auxquelles le modèle appréhende le champ urbain	1 2 3	Fragments urbains Ville Systèmes de villes
38	t	Précisions sur les échelles		
39	r	Dimensions de l'espace prises en compte par le modèle	1 2	2D 3D
40	r	Dimensions temporelles prises en compte par le modèle	1 2	Stationnaire Dynamique
41	l	Résolution spatiale du modèle (ordre de grandeur) ou unités spatiales de référence		
42	l	Le cas échéant, résolution temporelle du modèle		
43	t	Précisions sur la résolution spatiale et temporelle du modèle		
44	l	Famille à laquelle appartient le modèle (le cas échéant)		
45	t	Autre(s) modèle(s) de la même famille dans des domaines proches		
46	t	Spécificité du modèle au sein de sa famille		
47	t	Antécédents (le modèle décrit ici est-il lié directement à un ou plusieurs autres modèles développés antérieurement ?)		
48	t	Filiation (le modèle décrit ici a-t-il permis d'engendrer d'autres modèles ?)		
49	t	Problématique qui a conduit au développement du modèle		
50	t	Principales hypothèses utilisées par le modèle. Éventuellement, théories, paradigmes, principes ou lois générales auxquels il se réfère		
51	t	Principes de formalisation utilisés dans le modèle, méthodes employées		
52	t	Construction du modèle : principaux modules utilisés et architecture de l'ensemble		
53	t	Méthodes utilisées dans les modules de résolution : méthodes du calcul numérique, solutions analytiques, formules (semi)-empiriques, etc.		
54	t	Sensibilité du modèle, soit aux données d'entrée, soit aux paramètres utilisés. Méthode utilisée pour l'analyse de sensibilité		
55	r	Niveau actuel de validation du modèle	1 2 3 4 5	Validation définitive Incertitudes inhérentes au modèle ou aux mesures disponibles Validation partielle Travail de validation en cours Aucune validation
56	t	En cas de validation partielle, cas ou types de cas sur lesquels le modèle a été validé		
57	t	Méthodes de calibration ou de calage utilisées		
58	t	Problèmes rencontrés lors de la validation du modèle		
59	t	Principales limites du modèle, limites permanentes et limites temporaires		
60	t	Perspectives, recherches en cours ou à effectuer pour améliorer le modèle, avec leurs échéances prévisibles		
61	t	Nature des données nécessaires en entrée du modèle		
62	t	Interopérabilité en entrée : les données d'entrée sont-elles issues d'un ou plusieurs autres modèles		
63	t	Méthodes d'acquisition employées pour les autres données		

64	t	Nature des résultats fournis		
65	t	Post-traitements des résultats		
66	t	Quels autres outils peuvent-ils être utilisés pour les post-traitements ?		
67	t	Interopérabilité en sortie : les résultats sont-ils utilisés par un ou plusieurs autre(s) modèle(s) ? Quelles sont les conditions pour ce faire ?		
68	r	Matériel minimum requis	1 Super calculateur 2 Station de travail 3 Ordinateur personnel	
69	t	Autres matériels nécessaires, notamment en matière d'acquisition des données		
70	c	Motivations du choix matériel	1 Puissance de calcul 2 Volume important de données à traiter 3 Disponibilité d'outils spécifiques à ce support	
71	t	Précisions sur le choix du matériel		
72	c	Systèmes sous lesquels le modèle est utilisable	1 Unix / Linux 2 MS Dos 3 Windows 4 MacOS 5 Un autre système	
73	t	Autres ressources système nécessaires		
74	l	Code : langage dans lequel le modèle est principalement écrit		
75	t	Degré d'interdépendance du code spécifique du modèle et du code permettant sa mise en oeuvre		
76	t	Bibliothèques extérieures spécialisées auxquelles le code fait appel		
77	r	Le code est-il public ?	1 Oui 2 Non	
78	r	Temps de mise en oeuvre pour l'acquisition et la préparation des données	1 Moins d'une heure 2 Moins d'une journée 3 Plusieurs jours	
79	r	Temps de mise en oeuvre pour la résolution	1 Moins d'une heure 2 Moins d'une journée 3 Plusieurs jours	
80	r	Temps de mise en oeuvre pour les post-traitements et l'analyse des résultats	1 Moins d'une heure 2 Moins d'une journée 3 Plusieurs jours	
81	r	Niveau de documentation actuellement disponible	1 Description scientifique. Manuel d'utilisation, détails du code... 2 Description scientifique. Manuel d'utilisation plus ou moins complet 3 Description scientifique fondamentale 4 Documentation en cours d'élaboration 5 Aucune documentation	
82	t	Restrictions de diffusion de la documentation, le cas échéant		
83	r	Niveau d'utilisabilité	1 Expert 2 Public informé 3 Tout public	
84	l	Types d'utilisateurs		
85	l	Temps de formation au modèle pour ces utilisateurs		
86	t	Communauté d'utilisateurs et, le cas échéant, nombre d'utilisateurs et mode d'existence de la communauté		
87	t	Exemples significatifs d'application du modèle dans le champ urbain		
88	t	Abstract		
89	t	Principales publications relatives au modèle		
90	t	Autres commentaires		
91	c	Statut du rédacteur par rapport au modèle	1 Utilisateur 2 Concepteur et/ou développeur	
92	l	Précisions sur le statut du rédacteur par rapport au modèle		

93	r	Champ principal de compétence du rédacteur	1 2	Celui du modèle Un autre
94	l	Champ de compétence du rédacteur si ce n'est pas celui du modèle		
95	t	Appréciation du rédacteur sur la situation du modèle dans la communauté scientifique, les alternatives éventuelles et les équipes y travaillant		
96	r	Participation du rédacteur aux séminaires de restitution	1 2	Oui Non
97	l	Conditions de participation du rédacteur aux séminaires de restitution		
98	t	Nom et coordonnées du rédacteur		

1.2 Bilan général

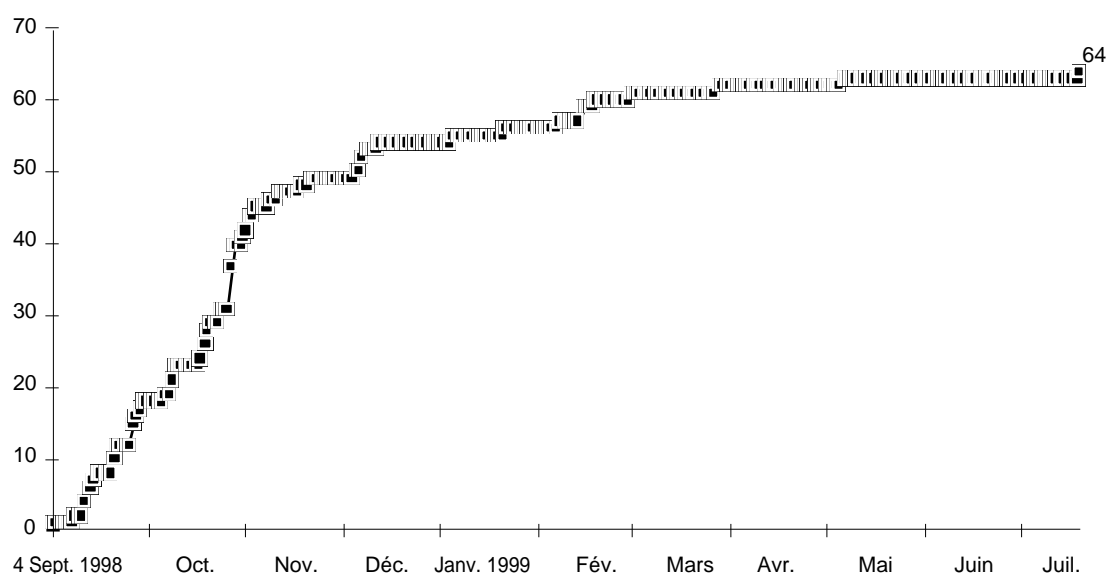
A la date d'écriture de ce rapport, l'inventaire comporte 64 descriptions de modèles issus de nombreux domaines du champ urbain. Nous présentons ici l'évolution chronologique des réponses ainsi que la liste des modèles recensés.

1.2.1 Évolution chronologique

Au total, 64 modèles ont été recensés entre le 4 septembre 1998, date d'ouverture de l'enquête, et le 19 juillet 1999, date de réception du dernier modèle inventorié.

Le graphique ci-dessous présente l'évolution chronologique des réponses. L'enregistrement des modèles a connu une phase croissante de son ouverture jusqu'au milieu du mois de novembre 1998, après quoi les réponses furent plus espacées. Une campagne d'information a été menée dans les premiers mois de l'action. Quatre séminaires d'analyse thématique des modèles ont également été organisés en novembre et décembre 1998. On notera que le Projet-Ville du CNRS, promoteur de cette action, a cessé d'exister au début de l'année 1999. Enfin, force est de constater qu'aucune activité significative n'est enregistrée depuis août 1999.

La moitié des 64 modèles inventoriés était enregistrés dès le 29 octobre 1998, soit quelques 39 jours ouvrés après l'ouverture de l'enquête. Durant cette période, le réseau interne et/ou le serveur du laboratoire accueillant les pages Web Inventur ont connu différents problèmes techniques qui ont réduit à 31 le nombre des jours effectivement utiles à l'action (jours ouvrés pour lesquels aucun problème technique n'est venu perturber l'inventaire). Durant cette période, la moyenne a donc été d'un modèle par jour utile.



Évolution chronologique des réponses à l'inventaire

1.2.2 Liste des modèles recensés

Nous reproduisons ci-dessous la liste des 64 modèles inventoriés à la date de ce rapport et dont les descriptions servent de base aux analyses qui suivent. Les auteurs des modèles sont également signalés de manière indicative. Chaque modèle est identifié par un numéro qui reprend l'ordre d'entrée dans l'inventaire. Dans la suite de ce document, nous ferons le plus souvent référence aux modèles par ce numéro d'identification que nous désignerons sous le signe « ID ». Les descriptions complètes des modèles sont disponibles sur les pages Web de l'action.

ID	Nom	Auteurs
01	CIT	F. Sillion iMAGIS Laboratoire GRAVIR / IMAG-INRIA Grenoble / J. Dorsey M.I.T. USA
02	SUPERNOVA	F. PAPON, INRETS ARCUEIL
03	TRANUS	MODELISTICA
04	AMAP	UNIL et CIRAD-AMIS
05	Modèle Global	D. Nguyen-Luong, IAURIF, PARIS
06	SIMRES	B. MARCHAND, Institut Français d'Urbanisme
07	TOWNSCOPE	LEMA - Université de Liege, Belgique
08	CESAR-LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées Paris
09	Modèle démographique de projection à long terme ...	J-L. Madre (INRETS) en collaboration
10	N3S	Laboratoire National d'Hydraulique EDF / Simulog
11	SOLENE-THERMIQUE	M.J. Antoine, CERMA, Ecole d'Architecture Nantes
12	MIGAL	B. SCHEOU, LET-ENTPE
13	MITHRA	CSTB service acoustique, Saint Martin d'Hères
14	MERCURE	Département Environnement, EDF
15	AZUR	Département Environnement, EDF
16	SiMoE (Simulation Mobiles Espace)	ATN sa, Philippe CASANOVA et Collaborateurs
17	FLUPOL	Anjou Recherche, Saint-maurice
18	HYDROWORKS	Anjou Recherche / Wallingford Software Ltd, UK
19	ANTONIN	HCG -France / Syndicat des Transports Parisiens
20	Negoce	B. Marchand
21	SIMURB	B. Marchand
22	Modèle intra-urbain de Peter Allen	P. Allen, Inst. d'Eco-Technologie, Cranfield U.K.
23	LISE-LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées Paris
24	ZEIS (Zero Emission Information System)	L. Adolphe, GRECO / Ecole d'archi. Toulouse
25	Modèle physique Image - Cordis-Anima	ACROE, INPG Grenoble
26	Modèle physique Son - Cordis-Anima	ACROE, INPG Grenoble
27	VUEMS	S. Donikian, R. Kulpa, G. Thomas, IRISA Rennes
28	HPTS	S. Donikian, G. Moreau, IRISA Rennes
29	OPTREZODO	P. Carpentier, G. Cohen, CAS, Ecole des Mines Paris
30	Bussièrre amendé	A. Bonnafous; E. Tabourin, LET, MRASH Lyon
31	QUINQUIN (Qualités Introduites, Quantités Insolubles)	E. Tabourin, LET, MRASH Lyon
32	MINOU (Modèle Interactif des Noyaux d'Offre commerciale Urbains)	ADEUPa de Brest / Technopôle Brest-Iroise
33	Modèle stratégique de déplacements de l'agglomération lyonnaise	Lichère Vincent (SEMALY), Raux Charles (LET)
34	IDOS	D. Desbois, S. Leflon, F. Bagnol, N. Guyomarch, F. Hanin
35	SOLENE - SIMULATION SOLAIRE	Groleau D., Marenne C., Laboratoire CERMA Ecole Architecture de Nantes
36	SOLENE - SIMULATION DE L'ACCESSIBILITE VISUELLE	Groleau D., CERMA Ecole Architecture de Nantes
37	SOLENE - SIMULATION DE L'ECLAIREMENT NATUREL	Miguet F., Groleau D., CERMA Ecole Architecture de Nantes
38	MINUTP	Hague Consulting Group (P-B) / HCG France
39	ADAPTATION DU MODELE DE POTENTIEL	J-P. Donnay, Lab. SURFACES, Liège, Belgique
40	FRETURB (modélisation des transports de marchandises en ville ou fret urbain)	J-L. Routhier, P-L. Aubert, LET, MRASH Lyon
41	Morphométrie et classification automatique	A. BEN SACI, Ecole d'architecture de Lyon

42	Géométrie aléatoire et réseaux de télécommunication	M. Klein, M. Lebourges, France Télécom / CNET
43	SUBMESO	P. G. MESTAYER, Laboratoire de Mécanique des Fluides, UMR CNRS 6598, Ecole Centrale de Nantes
44	CHENSI	J-F. SINI, Laboratoire de Mécanique des Fluides, UMR CNRS 6598, Ecole Centrale de Nantes
45	ASTUCE (Analyse Statistique des Tissus Urbains et Carto. Environnementale)	M. Daniel, IRIN, Fédération de Recherche CNRS 73 - Laboratoires CERMA, DAH, IRIN (Nantes)
46	MODUS (Modèle de déplacements urbains et suburbains)	Direction régionale de l'Equipement Ile de France, Division des Infrastructures et des Transports
47	ENVI-MET	M. Bruse, Inst. of Geography, Researchgroup Climatology, University of Bochum, Germany
48	MAIZIA	M. Maizia, LTMU, Champs sur Marne
49	POLLU'AIR	Trouvé M., Université du Maine
50	ORPHEA	CNRS Fédération de Recherche 73
51	PORTEAU-ZOMAYET	CEMAGREF Bordeaux
52	PORTEAU-OPOINTE	CEMAGREF Bordeaux
53	EQUARESEAU (Evolution de la QUALité en RESeau d'EAU potable)	Sophie Constans, Bernard Brémond, CEMAGREF Bordeaux
54	PHOENICS	B. SPALDING, Société CHAM (UK)
55	Un modèle synergétique de la dynamique d'un système de villes	G. Haag, W. Weidlich, Institut de physique théorique, Université de Stuttgart
56	MAP et NOD	A. L'Hostis, INRETS-TRACES / L. Chapelon, Maison de la Géographie de Montpellier
57	STRATEGE	Ruas A., Laboratoire COGIT, IGN
58	MODLUM	E. Viard, CRAI UMR MAP, Ecole d'Arch. Nancy
59	MEDINA	N. Allani-Bouhoula, J-P. Perrin, E. Viard, CRAI UMR MAP, Ecole d'Architecture de Nancy
60	GARIN-LOWRY	Lowry
61	UAM-V : Urban Airshed Model with variable grid	Systems Applications International, ICF Kaiser Engineers Inc., USA
62	RES-DYNAM	Baptiste H., Université de Tours - CESA
63	L'Elément Hydrologique	E. Berthier, Division EAU, LCPC Nantes
64	SIMPOP	S. Bura (LAFORIA), F. Guérin-Pace (INED), H. Mathian, D. Pumain et L. Sanders (équipe P.A.R.I.S.)

1.3 Analyse des modèles

1.3.1 État des réponses

Les questionnaires de description des modèles ont été remplis avec une grande attention comme nous le verrons ci-après. L'ensemble de la base constituée des seules réponses au questionnaire pour les 64 premiers modèles totalise 53 456 mots, soit l'équivalent d'un volume de 100 pages pleines si l'on compte environ 500 mots par pages. Il ne s'agit ici que de l'ensemble des réponses et du matériel effectivement utile à l'analyse. La restitution complète des résultats, comprenant l'intitulé des questions et les réponses obtenues pour les 64 modèles inventoriés pourrait dépasser les 500 pages.

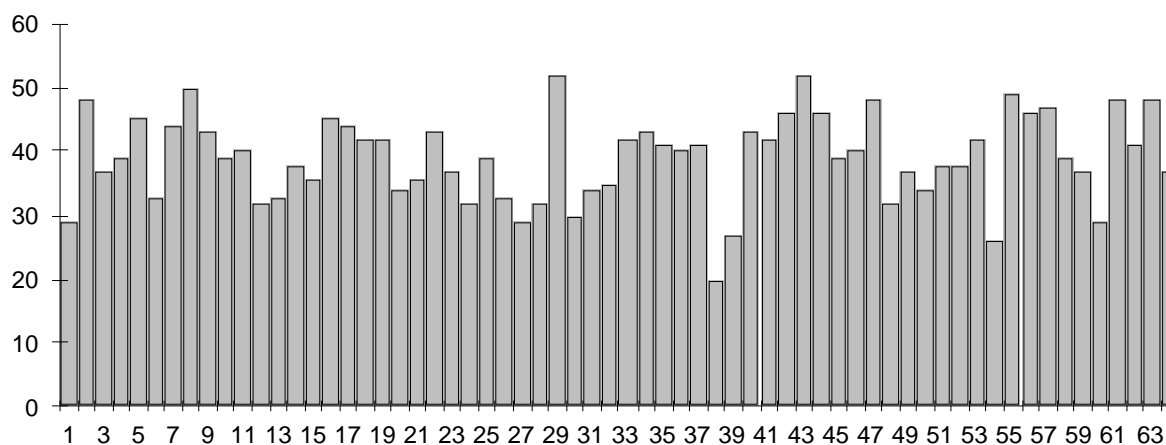
A travers ces valeurs relatives, l'on souhaite ici mettre en avant la richesse du matériau qui peut, modestement, contrebalancer la faiblesse de l'échantillon. Nous donnons ci-dessous quelques éléments susceptibles de mieux évaluer cette richesse, ainsi que de caractériser les modèles et les champs du questionnaire en fonction des réponses proposées par les premiers et reçues dans les derniers.

• Nombre de champs renseignés par modèles

Le graphique ci-dessous donne le nombre de champs de type texte ou ligne renseignés pour chacun des 64 modèles inventoriés. Nous restreignons l'analyse au 68 champs de ces deux types que contient le questionnaire (sur les 98 champs au total), étant entendu que les autres champs, de type choix unique ou choix multiple, sont implicitement considérés comme obligatoires et, en conséquence, renseignés par tous les modèles.

En moyenne, les modèles renseignent plus de 39 champs ligne ou texte sur les 68 existants. Par ailleurs, 50 modèles sur les 64 recensés renseignent au moins la moitié de ces champs (34 sur 68).

Certains modèles présentent un nombre de réponses particulièrement important. Ainsi, les

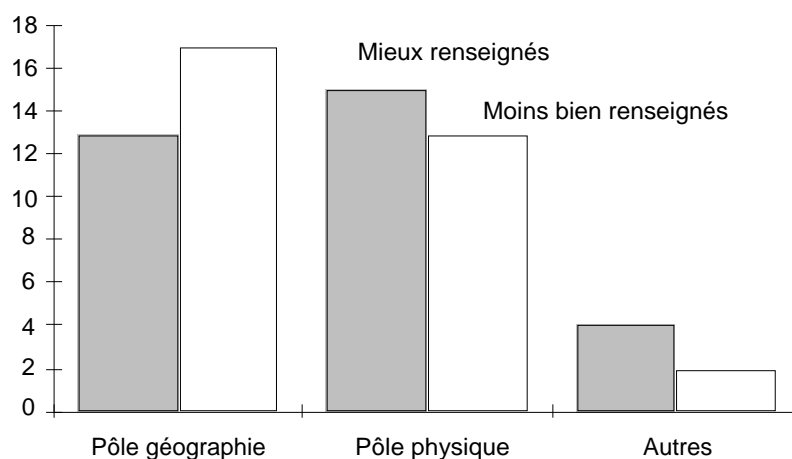


Nombre de champs de type texte ou ligne renseignés pour chacun des 64 modèles inventoriés

modèles ID 29 (OPTREZODO) et 43 (SUBMESO) présentent tous deux le plus grand nombre de champs renseignés (52). De même, les modèles ID 29, 43, 8, 55, 2, 47, 61, 63, 57, 42, 44, 56, 5 et 16 renseignent au moins 45 champs sur 68. A l'inverse, quelques modèles sont moins prolixes, comme l'ID 38 (MINUTP, 20 champs renseignés), l'ID 54 (26 champs) ou l'ID 39 (27 champs). On note cependant que seuls 6 modèles sur l'ensemble renseignent moins de 30 champs sur 68.

On peut découper l'ensemble des modèles en deux sous-ensembles de mêmes cardinaux, le premier contenant les 32 modèles présentant le plus grand nombre de réponses aux champs de types texte et ligne. On obtient ainsi un groupe de modèles dits « mieux renseignés » et son complémentaire formé des modèles dits « moins bien renseignés ».

En utilisant les catégories que nous définirons plus loin (cf. § 2.1.1) et qui nous permettent de classer les modèles inventoriés en trois groupes que l'on nomme « pôle géographie », « pôle physique » et « autres », on obtient les résultats présentés dans le graphique ci-dessous. On observe ainsi que les modèles du pôle géographie sont globalement moins bien renseignés que ceux du pôle physique. De ce point de vue, en faisant abstraction de la motivation des rédacteurs, on pourrait penser le questionnaire Inventur est mieux adapté à la description des modèles développés dans les sciences exactes.



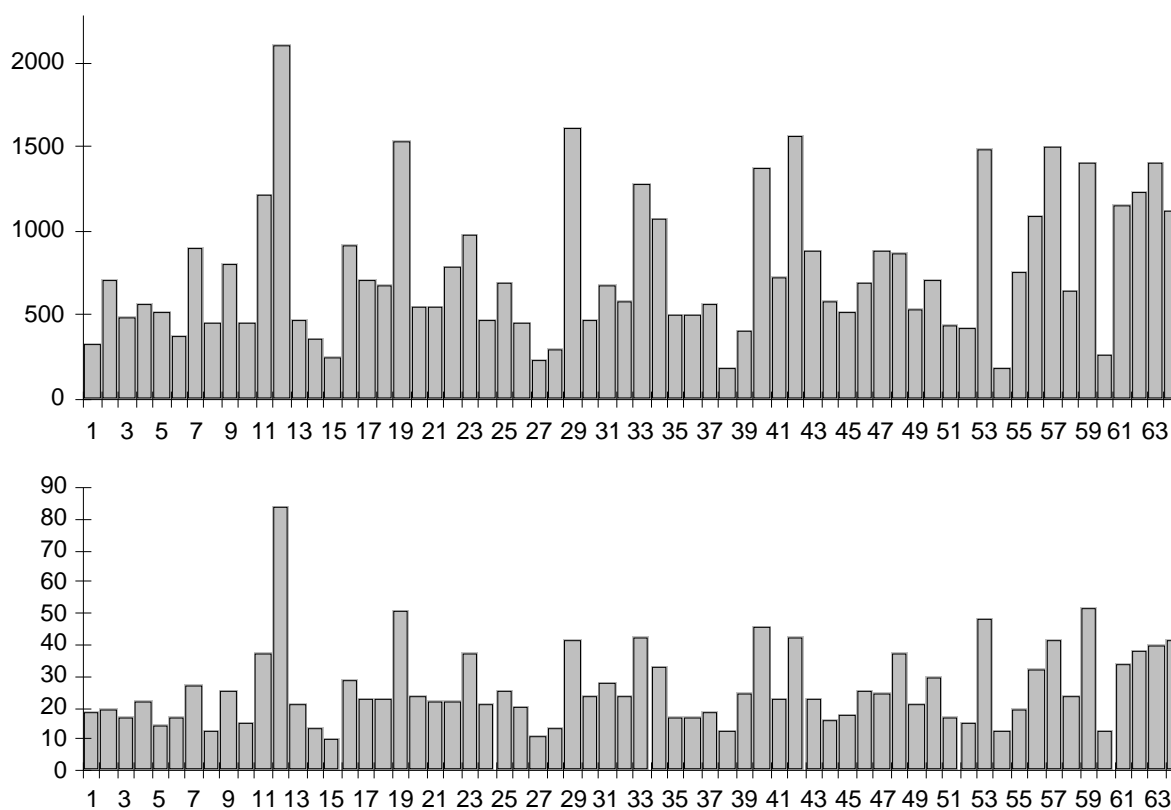
État des réponses par domaines (en nombre de champ de types texte et ligne renseignés par modèle)

• Nombre de mots par modèles

Le nombre de champs renseignés par modèle fournit une première indication du niveau des réponses, certes nécessaire mais non suffisante. En complément, nous pouvons évaluer la richesse des réponses, par exemple en comptant le nombre total de mots proposés pour chaque description de modèle et pour les champs de type texte seulement (les champs de type ligne ne permettent pas de réponse prolixes).

Les résultats sont représentés dans le graphique page suivante (en haut). On remarque que la richesse de réponses, évaluée en nombre de mots, est très inégale suivant les modèles : pour une moyenne de 768 mots par description, on observe un maximum à plus de 2000 mots (modèle ID 12, MIGAL, 2106 mots), et un minimum à moins de 200 mots (ID 38, MINUTP, 177 mots). Sur les 64 modèles inventoriés, 16 utilisent plus de 1000 mots pour leur description, tous champs de type texte confondus (ID 12, 29, 42, 19, 57, 53, 59, 63, 40, 33, 62, 11, 61, 64, 56, 34), tandis que 19 se contentent de moins de 500 mots (ID 3, 30, 24, 13, 8, 10, 26, 51, 52, 39, 6, 14, 1, 28, 60, 15, 27, 54, 38).

Les résultats en moyenne (nombre moyen de mots par champ de type texte renseigné, graphique ci-dessous en bas) suivent bien les précédents. Pour une moyenne de 26 mots par champ renseigné, on trouve un maximum à 84 mots (modèle ID 12) et un minimum à moins de 10 mots (ID 15). Les 11 modèles utilisant plus de 40 mots en moyenne par champ texte renseigné (ID 12, 59, 19, 53, 40, 33, 42, 64, 57, 29, 63) sont également ceux qui utilisent le plus de mots au total (dans un ordre légèrement différent). De même, les 22 modèles utilisant moins de 20 mots en moyenne (ID 55, 2, 37, 1, 45, 3, 51, 36, 6, 35, 44, 52, 10, 5, 28, 14, 8, 60, 54, 38, 27, 15), se retrouvent en partie parmi ceux utilisant le moins de mots au total.

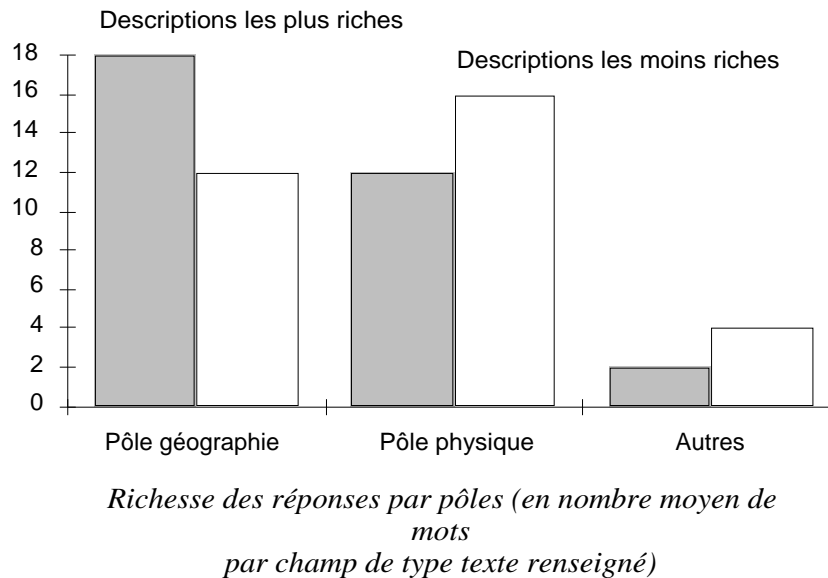


En haut : nombre total de mots par modèle pour les champs de type texte.

En bas : nombre moyen de mots par modèle et par champ texte renseigné

En se basant sur ces moyennes et en utilisant la méthode décrite plus haut, on peut isoler le sous-ensemble des 32 modèles dont les réponses sont « les plus riches » (en nombre moyen de mots par champ renseigné) et son complémentaire présentant les 32 descriptions « les moins riches ». Si l'on classe ces ensembles par pôle, on obtient les résultats représentés dans le graphique page suivante. On observe que ce sont les modèles du pôle géographie qui présentent les descriptions les plus riches, tandis que ceux du pôle physique proposent des descriptions globalement moins riches (en nombre moyen de mots par champ de type texte renseigné).

Au total, on constate que si les modèles du pôle physique renseignent en général un plus grand nombre de champs texte et, de ce fait, répondent de manière plus exhaustive au questionnaire, leurs réponses sont globalement moins prolixes (ou plus concises). Au contraire, les modèles du pôle géographie, qui renseignent en moyenne moins de champs, fournissent des réponses plus étendues, et donc supposées plus riches, aux champs qu'ils complètent. Les modalités de descriptions des modèles apparaissent donc différentes suivant les cultures scientifiques : discursive, riche mais moins complète dans le pôle géographie ; synthétique, sommaire mais plus exhaustive dans le pôle physique.



• Nombre de modèles par champ

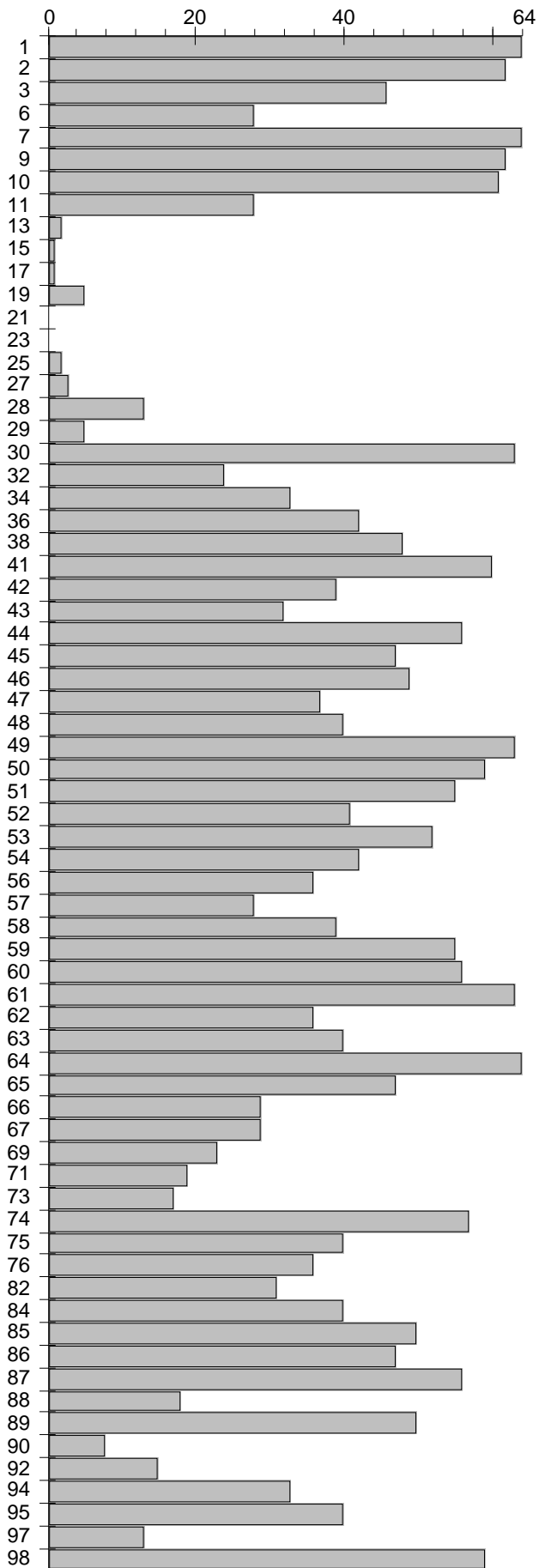
Quels sont les champs du questionnaire qui semblent les plus pertinents du point de vue des modélisateurs ? Quels sont ceux qui au contraire trouvent moins d'écho chez les rédacteurs du questionnaire ? Quelques éléments de réponse peuvent être apportés par le décompte du nombre de modèles répondant aux 68 champs de type texte ou ligne du questionnaire. Le graphique page suivante synthétise les résultats. On note que la majorité des champs (44 sur 68) sont renseignés par la majorité des modèles (au moins 32 sur 64). Ce constat se traduit par une moyenne de près de 37 modèles répondant à chacun des champs de la liste.

Trois champs sont renseignés par tous les modèles : le nom du modèle (champ 1), l'identité des auteurs (champ 7) et la nature des résultats fournis par le modèle (champ 64). Ensuite, 7 champs sont renseignés par au moins 60 modèles sur les 64 inventoriés : les phénomènes que le modèle permet de simuler ou d'évaluer (champ 30, 63 réponses), la problématique qui a conduit au développement du modèle (champ 49, 63 réponses), la nature des données en entrée (champ 61, 63 réponses), l'année de création du modèle (champ 2, 62 réponses), le nom et l'adresse électronique de la personne à contacter préférentiellement (champs 9 et 10, 62 réponses chacun), et enfin la résolution spatiale du modèle (champ 41, 60 réponses).

Parmi les champs les moins bien renseignés (moins de 25 réponses), on note le champ 90 (autres commentaires sur le modèle, 8 réponses), le champ 92 (précisions sur le statut du rédacteur par rapport au modèle, 13 réponses), le champ 71 (précisions sur le choix matériel, 19 réponses), ou encore le champ 32 (précisions sur les objectifs, 24 réponses). On remarque que ces champs concernent tous des précisions à apporter sur un point abordé dans une autre question, elle-même en général bien renseignée. Par ailleurs, le fait que les rédacteurs renseignent peu le champ permettant d'apporter d'autres commentaires sur le modèle peut laisser penser que le questionnaire est suffisamment complet.

• Nombre de mots par champ

A quels champs du questionnaire Inventur les modélisateurs apportent-ils les réponses les plus complètes ? En complément de l'évaluation du nombre de modèle par champ, on peut évaluer la richesse des descriptions des modèles en effectuant le décompte du nombre de mots pour chacune des réponses de type texte seulement (et non de type ligne). On peut également rapporter ce nombre total de mots au nombre de réponses, afin d'obtenir le nombre moyen de mots par réponse et par champ.



Nombre de réponses par champ de type texte ou ligne

En valeur absolue, c'est le champ 88 (abstract) qui totalise le plus grand nombre de mots (4842), avec pourtant 18 réponses seulement (graphique page suivante à gauche). A titre de comparaison, ce nombre représente plus de 64 paragraphes identiques à celui où est insérée cette phrase (75 mots). On peut penser que les rédacteurs du questionnaire ont utilisé les armes du copier-coller pour reproduire, dans ce champ, le résumé d'un document publié par ailleurs.

Viennent ensuite le champ 49 (problématique, 3441 mots), le champ 50 (hypothèses, 2909 mots), puis le champ 51 (formalisation et méthodes, 2536 mots). De manière plus générale, 18 champs totalisent plus de 1000 mots parmi lesquels, outre ceux cités qui viennent en tête, on trouve le champ 59 (principales limites, 1803 mots), le champ 60 (perspectives, recherches en cours, 1756 mots), le champ 61 (nature des données, 1632 mots), le champ 30 (les phénomènes que le modèle permet de simuler ou d'évaluer, 1593 mots), le champ 64 (nature des résultats, 1555 mots) ou encore le champ 87 (exemples d'application du modèle dans le champ urbain, 1459).

Les rédacteurs du questionnaire répondent donc plus « en scientifiques » qu'en utilisateurs de modèles. Ils précisent le plus clairement les éléments qui sont au cœur de la recherche en modélisation : la problématique, les hypothèses, les principes de formalisation et les méthodes employées. Mais ils ne dédaignent pas de s'étendre également sur les limites de leur modèle (constat intéressant), sur les perspectives de recherche pour améliorer le modèle, la nature des résultats et des données, les phénomènes modélisés ainsi que sur les applications effectives du modèle dans le champ urbain.

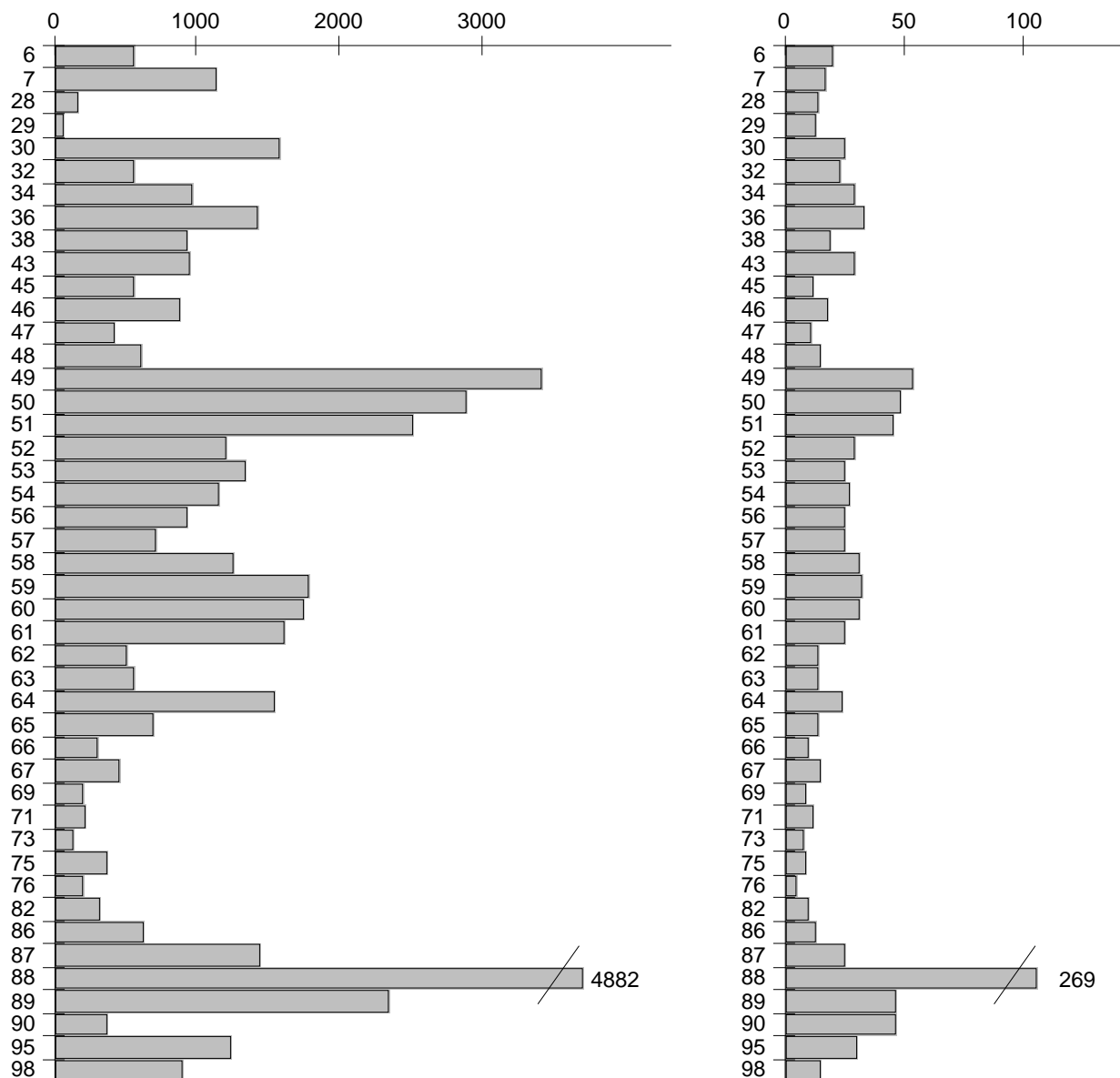
Les résultats en valeur relative (nombre moyen de mots par réponse et par champ de type texte, graphique page suivante à droite) vont dans le même sens. Ainsi, parmi les champs comptant plus de 40 mots en moyenne par réponse, le champ 88 (abstract) arrive en tête avec 269 mots en moyenne par réponses, pour seulement 18 réponses. Suivent le champ 49 (problématique, 54 mots), le champ 50 (principales hypothèses, 49 mots), le champ 90 (autres commentaires, 47 mots par réponses pour seulement 8 réponses), le champ 89 (principales publications relatives au modèle, 47 mots en moyenne pour 50 réponses), et le champ 51 (principes de formalisation et méthode, 46 mots en moyenne). Les champs les mieux renseignés en moyenne sont là encore de nature scientifique : la problématique, les hypothèses et les principes de formalisation mis en oeuvre, sans compter l'abstract et les références bibliographiques, champs propres à la culture scientifique.

1.3.2 Méthodes d'analyse

Les descriptions de modèles a été compilées par champs dans une base de données ouverte, sur laquelle divers développements ont été effectués afin de produire les paramètres utiles à l'analyse. Ces développements ont été produits « à la volée ». Les résultats chiffrés ont ensuite été exportés, représentés graphiquement, et parfois également analysés, grâce aux fonctions d'un tableur.

Les champs de type choix unique et choix multiples parmi n ont fait l'objet de comptage et synthèses statistiques, le plus souvent présentés par domaines ou par pôles. Pour les champs de type choix multiples, des procédures de comptage des combinaisons d'options ont également été développées (recherche des occurrences de profils).

Ces comptages ont été réalisés systématiquement sur l'ensemble des modèles, mais également, lorsque le besoin s'en est fait sentir, sur des sous-ensembles représentatifs qui constituent des filtres appliqués sur la base complète. Ces sous-ensembles ont été définis automatiquement (résultats de comptages) ou manuellement, en utilisant par exemple des interprétations des réponses obtenues aux champs de type texte. Des procédures de manipulation des filtres sont également accessibles.



*A gauche : nombre total de mots par champ.
A droite : nombre moyen de mots par réponse et par champ
(les barres du champ 88 sont tronquées)*

Les champs de type texte ou ligne (texte sans saut de ligne) ont été explorés de deux manières : par une procédure de décompte des occurrences de mots sur un texte formé d'un ensemble de réponses (en tenant compte des pluriels en « s »), et / ou par des analyses manuelles du contenu des réponses, visant à réaliser diverses interprétations et classements des modèles. Pour ces dernières, les résultats sont naturellement dépendants de la compétence de l'analyste et, en ce sens, ils pourront parfois apparaître arbitraires.

D'autres procédures plus spécifiques ont été également mises en oeuvre, comme celle permettant de reclasser des sous ensembles quelconques de modèles par domaines et par pôles (recherche de corrélations thématiques), celle permettant l'analyse chronologique des modèles suivant différents paramètres (recherche de corrélations temporelles), ou encore celle permettant de comparer l'état simultané des réponses à plusieurs champs (recherche de profils).

Interface de la base de données Inventur (novembre 1999). Les boutons en haut pointent sur les champs du questionnaire. Le menu au milieu donne la liste des modèles. La fenêtre centrale reçoit les résultats (la réponse du modèle actif au champ actif, ou les résultats d'une procédure). En bas, les boutons permettent d'obtenir les statistiques sur le champ actif, la liste des réponses sur ce champ, ou encore d'accéder aux autres procédures développées. Le filtre choisi (par domaine ou arbitraire) est défini dans le fenêtre basse.

• Avertissements

Les réponses au questionnaire ont été exploitées telles qu'elles figurent dans la base de données, avec les imprécisions ou les erreurs éventuelles dues à leurs auteurs. En particulier, la syntaxe et l'orthographe des réponses n'ont pas été modifiées pour toutes celles que nous avons reçues par voie numérique. Les quelques réponses écrites à la main ont été reproduites avec le maximum d'attention, sans garantie de fidélité parfaite, notamment lorsque la lisibilité du texte manuscrit était défaillante.

Par ailleurs, compte tenu du mode de recensement choisi et des moyens techniques mis en jeu, le chemin entre le rédacteur du questionnaire et la base de données a pu être parfois

tortueux et transiter par plusieurs mises en forme. Malgré nos efforts, il se peut que ces manipulations semi-automatiques et manuelles aient altéré le matériau initial.

Les procédures développées pour les comptages et analyses ont été validées autant que possible. Toutefois, des erreurs ont pu survenir dans le développement, dans la transcription des résultats ou encore dans les représentations graphiques. Nous nous en excusons par avance auprès des lecteurs et leur demandons de nous signaler leurs constats à ce niveau.

Enfin, le rédacteur de ce rapport n'est pas un spécialiste des méthodes d'analyse de données. Il se peut donc que des méthodes utiles à notre propos nous soient inconnues et manquent à l'analyse, ou encore que des méthodes présentées ici sous un jour naïf correspondent à des techniques communes que nous ignorons. Le cas échéant, nous saurions gré aux lecteurs de nous faire part de leurs remarques à ce sujet.

1.3.3 Objectifs et plan de ce rapport

Partant du matériau recueilli dont on a apprécié ci-dessus la teneur, et à l'aide des méthodes développées, nous proposons ici un bilan général des réponses par champs du questionnaire, complété de recoupements et de synthèses plus transversales. Nous nous contenterons d'un regard général sur les modèles, en évitant autant que possible de mettre en avant les cas particuliers. Ce faisant, il apparaîtra au lecteur que ce rapport n'est ni une compilation de monographies sur les modèles inventoriés, ni un état de l'art sur la modélisation urbaine, ni encore une tentative de comparaison des modèles par domaines. Nous nous interdisons ces approches qui exigent une compétence pluridisciplinaire que nous ne prétendons pas avoir.

Cependant, ce rapport n'est pas non plus une simple lecture statistique des résultats de l'inventaire. Au contraire, nous proposons d'organiser ces résultats autour de quelques problématiques centrales de la modélisation. Dans cet objectif, nous analysons nos résultats dans quatre parties qui intéressent successivement :

- **l'état des problématiques actuelles de la modélisation urbaine**, au travers des domaines et thèmes abordés ainsi que les principaux phénomènes modélisés, l'évolution chronologique de la production de modèle suivant ces thèmes, ainsi que les échelles du champ urbain appréhendées et des dimensions prises en compte dans les modèles ;
- **les motivations des auteurs de modèles du champ urbain**, que nous détaillerons par l'analyse de la provenance des modèles, les objectifs de la modélisation et les problématiques qui conduisent au développement des modèles, le public potentiellement visé par ceux-ci, la diffusabilité et la diffusion effective des modèles vers ce public ;
- **les capacités et limites opérationnelles des modèles**, qui seront analysées en tant que telles et complétées par l'étude du niveau d'utilisabilité des modèles, des difficultés pratiques de mise en oeuvre de ceux-ci, ainsi que des questions importantes concernant la validation et la documentation des modèles ;
- une appréciation succincte des **aspects scientifiques de la modélisation urbaine**, que nous aborderons au travers de la nature des données et résultats, de l'utilisation de quelques concepts transversaux de la modélisation, ainsi que des hypothèses et méthodes mises en oeuvre dans les modèles. Cette dernière partie, qui rentre en plein dans l'intimité des modèles, semble la plus difficile à réaliser et elle sera sans doute la moins détaillée.

Nous proposerons pour conclure quelques éléments de discussion des résultats recueillis tout au long de ce rapport.

2.

Etat des problématiques actuelles de la modélisation urbaine

Que modélise-t-on dans le champ urbain, à quelles échelles et depuis quand ?

2.1 Domaines et thèmes

Dans cette section, nous tentons une première analyse des modèles en nous attachant aux domaines et aux thèmes prédéfinis dans le questionnaire Inventur (champs 12 à 29), tels qu'ils sont représentés dans les 64 modèles recensés. Nous étudions également le champ 30 concernant les phénomènes que le modèle permet de simuler ou d'évaluer.

Au travers de ces résultats, nous proposons une première organisation thématique des modèles du champ urbain, en montrant les pôles principaux, les rapports de force éventuels ainsi que les thèmes transversaux qui semblent émerger.

2.1.1 Analyse par domaines

• Principe d'affectation thématique

Le tableau page suivante rappelle les 8 domaines et les 44 thèmes explicites associés à ce domaines, tels qu'ils ont été définis dans le questionnaire Inventur. Les rédacteurs du questionnaire devaient naturellement inscrire leur modèle dans au moins un thème d'au moins un domaine (y compris le thème « Autres » du domaine « Autres » au besoin, sous réserve d'explicitation). Ils pouvaient également inscrire leur modèle dans plusieurs thèmes du même domaine, ou dans plusieurs thèmes de domaines différents. Nous verrons plus loin que tel est généralement le cas.

Dans la suite de ce document, nous donnerons souvent une présentation par domaines des résultats statistiques relatifs à différents sujets. Pour établir cette segmentation, nous avons adopté le principe d'affectation thématique suivant : un modèle appartient à l'un des 8 domaines prédéfinis si, pour ce modèle, au moins un thème du domaine est coché. De la sorte, un modèle appartient en général à plusieurs domaines. Par ailleurs, pour rester au plus près des réponses au questionnaire, nous avons choisi de ne pas attribuer de « domaine principal » pour chacun des modèles, ce qui aurait engagé une décision plus ou moins arbitraire de l'analyste, sans parler des problèmes éventuels pour certains modèles transdisciplinaires. Ces principes conditionnent toutes les données statistiques présentées par la suite, aussi est-il bon de les conserver en mémoire à la lecture des résultats.

• Codification

On établit la codification suivante utilisée dans la suite de ce document et, en particulier, dans les graphiques et tableaux de résultats :

- 1 : G : Géographie et Dynamique spatiale
- 2 : E : Économie et Gestion urbaine
- 3 : S : Sociologie
- 4 : T : Transports
- 5 : R : Réseaux techniques
- 6 : P : Physique urbaine
- 7 : C : Risques et Cindyniques
- 8 : M : Morphologies urbaines
- 9 : A : Autres domaines

Nous aurons recours indifféremment aux chiffres ou aux lettres de ce code pour désigner les domaines.

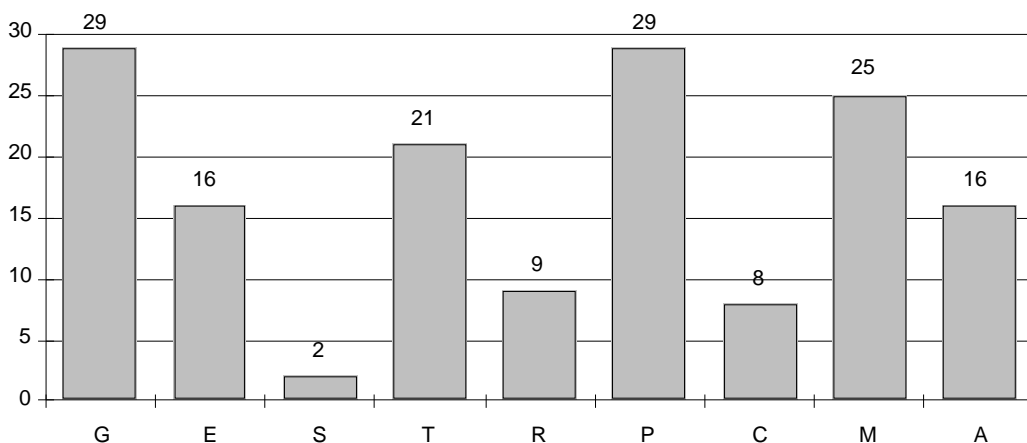
<p>Géographie et dynamique spatiale</p> <ul style="list-style-type: none"> Dynamique spatiale intra-urbaine Mobilité quotidienne Choix résidentiels Utilisation du sol Dynamique des systèmes de villes Systèmes d'information géographique Géomarketing Autres champs de la géographie <p>Économie et gestion urbaine</p> <ul style="list-style-type: none"> Marché foncier et immobilier Marché du travail Gestion urbaine Localisations des activités Autres champs de l'économie urbaine <p>Sociologie</p> <ul style="list-style-type: none"> Réseaux sociaux Intégration / Exclusion Criminalité / Violence Autres champs de la sociologie <p>Transports</p> <ul style="list-style-type: none"> Demande de transport Choix modal Logistique Interconnexion Réseaux de transport intra-urbain Réseaux de transport inter-urbain Autres champs des transports <hr/> <p>Autres domaine(s)</p> <ul style="list-style-type: none"> Autres champs des autres domaines 	<p>Réseaux techniques</p> <ul style="list-style-type: none"> Eau / Eaux usées / Assainissement Électricité Réseaux hertziens / Télécommunications Réseaux de chaleur Réseaux de transport de gaz Réseaux de collecte de déchets urbains Autres champs des réseaux techniques <p>Physique urbaine</p> <ul style="list-style-type: none"> Climatologie urbaine Aéraulique / Pollution de l'air Hydrologie / Pollution de l'eau Sols / Mécanique des sols / Pollution des sols Thermique et énergétique urbaine Acoustique urbaine Éclairage naturel et artificiel Végétation Autres champs de la physique urbaine <p>Risques et cindyniques</p> <ul style="list-style-type: none"> Risques naturels Risques épidémiologiques ou toxicologiques Risques industriels Autres champs des risques et cindyniques <p>Morphologies urbaines</p> <ul style="list-style-type: none"> Modèles de terrain Tissus urbains / Architecture urbaine Urbanisme / Développement urbain Modèles fractals Téledétection / Radar Photogrammétrie / Reconstruction 3D Imagerie urbaine Autres champs des morphologies urbaines
--	---

Domaines et champs proposés pour l'inventaire

• Bilan général

Le graphique page suivante donne le nombre de modèles inventoriés par domaines, suivant le principe d'affectation thématique décrit plus haut. Les domaines les plus représentés sont la géographie et la physique (29 modèles sur 64 s'inscrivent dans chacun d'eux). Suivent les domaines des morphologies urbaines (25 modèles sur 64) puis celui des transports (21 modèles) et de l'économie et la gestion urbaine (16 modèles).

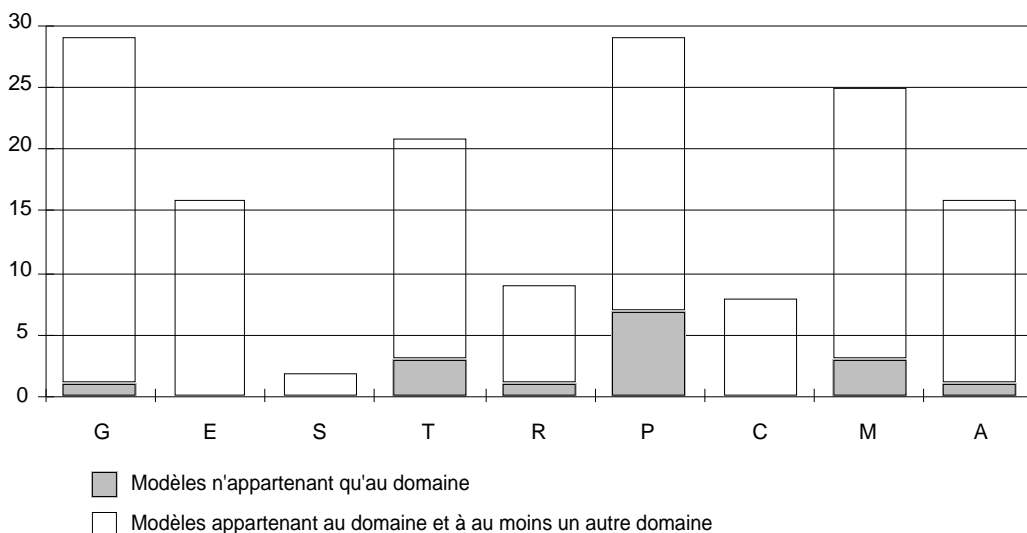
Les domaines des réseaux techniques et des risques sont globalement peu représentés (9 et 8 modèles respectivement). Celui de la sociologie est très mal représenté (2 modèles seulement abordent les thématiques correspondantes). Par la suite, les résultats associés à ce domaine n'auront donc aucune représentativité (nous les conservons pour des raisons de commodité, les graphiques étant produits automatiquement selon les 8 domaines initiaux).



Répartition générale des modèles dans les domaines (en nombre)

En première analyse, les modèles semblent fortement pluridisciplinaires puisque la somme des entrées dans le graphique ci-dessus est 2,42 fois supérieur au nombre de modèles inventoriés : en moyenne, les modèles s'inscrivent donc dans plus de 2 domaines à la fois.

Pour confirmer ce point, l'on peut calculer la part de modèles « monothématiques » au sein de chaque domaine, c'est-à-dire le nombre de modèles n'appartenant qu'à ce domaine (graphique ci-dessous). Seuls 16 modèles sur 64 (25 %) entrent dans cette catégorie. Dans le détail, on constate que seul le domaine de la physique présente une proportion relative plus importante de modèles « monothématiques ». Les autres domaines sont représentés par une forte proportion de modèles appartenant à plusieurs domaines. En particulier, on note dans le domaine de la géographie une très forte proportion de modèles transversaux.



Parts des modèles « monothématiques » et des modèles « transversaux », (en nombre par domaines)

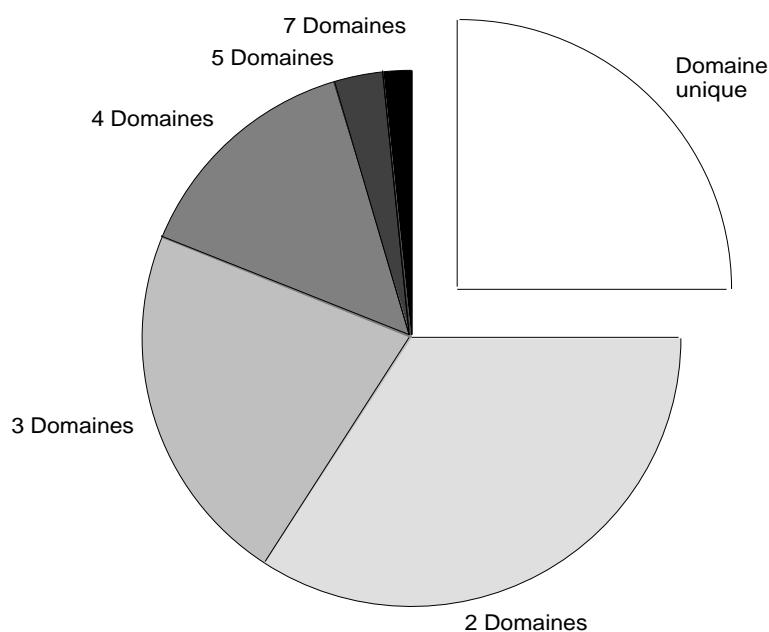
• Regroupements par domaines

Le tableau général ci-après dresse la liste de l'ensemble des regroupements par domaines représentés dans l'inventaire. On note les différentes combinaisons de domaines (par numéros de domaines), la liste des modèles correspondants (par leur numéro d'identification dans Inventur) et le nombre total de modèles représentant exactement chacune des

combinaisons listées. Toutes les combinaisons de deux domaines sont listées afin de constater lesquelles sont représentées et, de manière parallèle, lesquelles ne le sont pas. Pour les combinaisons de plus de deux domaines, seules celles qui sont représentées dans l'inventaire sont listées dans le tableau. On note par exemple des associations remarquables de 3 et 4 domaines :

- Transports, réseaux techniques et physique (2 modèles)
- Géographie, économie et transports : (4 modèles dont 2 ajoutent les morphologies urbaines en plus)

Une représentation synthétique des combinaisons représentées peut être donnée sous la forme du graphique ci-dessous. Comme indiqué plus haut, on constate que le quart des modèles s'inscrivent dans un domaine unique (avec plusieurs sous-thèmes dans ce domaine, éventuellement). Plus du tiers des modèles s'inscrivent au croisement de deux domaines, et plus de 20 % au croisement de trois domaines. On note également 14 % des modèles s'inscrivant dans quatre domaines à la fois, sans parler des quelques modèles qui affichent des compétences dans cinq, voire sept domaines.



Types de combinaisons par domaines représentées

Cependant, malgré la forte pluridisciplinarité apparente, les domaines uniques ne sont pas tous représentés. Par exemple, aucun modèle s'inscrit de manière unique dans le domaine de l'économie urbaine, de la sociologie (non représentatif) ou des risques (cf. graphique page précédente). De même, les combinaisons de deux domaines (seulement) sont loin d'être toutes représentées comme le montre le tableau suivante.

Par ailleurs, on remarque que près de la moitié des modèles (45 %) s'inscrivent en partie ou complètement dans le domaine de la géographie ou celui de la physique, ceux-ci constituant dès lors deux pôles remarquables, capables d'agréger autour d'eux des thématiques disparates (par exemple : économie et géographie, transports et géographie, réseaux techniques et physique, risques et physique, etc.). Ce phénomène fait l'objet de la suite de notre analyse.

	Domaines	Modèles (ID Inventur)	Nbre		
Domaines unique	1	55	1	16 sur 64	
	2		0		
	3		0		
	4	2, 5, 38	3		
	5	29	1		
	6	10, 11, 13, 35, 37, 44, 54	7		
	7		0		
	8	34, 41, 48	3		
	9	36	1		
Combinaisons de deux domaines représentées et non représentées	1 2	22, 64	2	22 sur 64	
	1 3		0		
	1 4	19, 46, 62	3		
	1 5		0		
	1 6		0		
	1 7		0		
	1 8	1, 39, 59	3		
	1 9	25	1		
	2 3		0		
	2 4		0		
	2 5		0		
	2 6		0		
	2 7		0		
	2 8		0		
	2 9		0		
	3 4		0		
	3 5		0		
	3 6		0		
	3 7		0		
	3 8		0		
	3 9		0		
	4 5		0		
	4 6		0		
	4 7		0		
	4 8	27	1		
	4 9	28	1		
	5 6	17, 18	2		
	5 7		0		
	5 8		0		
	5 9	53	1		
	6 7	14, 15, 43, 61	4		
	6 8	23, 45, 50	3		
	6 9	26	1		
7 8		0			
7 9		0			
8 9		0			
Autres combinaisons représentées	1 2 4	12, 56	2	14 sur 64	
	1 2 8	30	1		
	1 2 9	21	1		
	1 4 6	9	1		
	1 4 8	16	1		
	1 4 9	31	1		
	1 6 7	49	1		
	1 8 9	57	1		
	2 5 9	42	1		
	4 5 6	51, 52	2		
	5 6 7	63	1		
	6 8 9	58	1		
	1 2 3 4	60	1		9 sur 64
	1 2 4 8	3, 40	2		
	1 2 6 8	47	1		
	1 2 8 9	6	1		
	1 4 6 8	33	1		
	1 6 8 9	7	1		
	2 3 8 9	20	1		
	6 7 8 9	8	1		
	1 2 4 8 9	32	1	2	
	1 2 6 8 9	4	1		
	1 2 4 5 6 7 8	24	1	1	

• Associations remarquables

Le tableau précédent donnait l'ensemble des regroupements de domaines présents dans l'inventaire. En utilisant ces données, on peut noter les associations remarquables de deux domaines, qu'ils soient associés strictement (X et Y seulement) ou associés parmi d'autres domaines (X et Y associés dans la combinaison A X B Y par exemple). Ainsi, les domaines 1 et 8 (géographie et morphologies urbaines) sont associés dans 15 modèles sur 64 (près du quart), les domaines 1 et 2 de même que 1 et 4 dans 14 modèles, 6 et 8 dans 10 modèles, etc.

Le tableau ci-dessous fournit un décompte de principales associations remarquables dans l'ensemble des combinaisons de domaines. Nous les présentons en trois groupes qui confirment l'organisation des modèles en deux pôles articulés autour des domaines de la géographie et de la physique. Un troisième pôle, présentant des regroupements transversaux entre les deux premiers, est également proposé sous l'étiquette « modèles transversaux ou génériques ».

Modèles (ID Inventur)		Total
Articulation autour du domaine de la géographie		
Domaines 1 et 8	1, 3, 4, 6, 7, 16, 24, 30, 32, 33, 39, 40, 47, 57, 59	15
Domaines 1 et 2	3, 4, 6, 12, 21, 22, 24, 30, 32, 40, 47, 56, 60, 64	14
Domaines 1 et 4	3, 9, 12, 16, 19, 24, 31, 32, 33, 40, 46, 56, 60, 62	14
Domaines 2 et 8	3, 4, 6, 20, 24, 30, 32, 40, 47	9
Domaines 2 et 4	3, 12, 24, 32, 40, 56, 60	7
Domaines 4 et 8	3, 16, 24, 27, 32, 33, 40	7
Domaines 4 et 5	24, 51, 52	3
Domaines 4 et 6	9, 24, 33, 51, 52	5
Domaines 2 et 3	20, 60	2
Articulation autour du domaine de la physique		
Domaines 6 et 8	4, 7, 8, 23, 24, 33, 45, 47, 50, 58	10
Domaines 6 et 7	8, 14, 15, 24, 43, 49, 61, 63	8
Domaines 5 et 6	17, 18, 24, 51, 52, 63	6
Domaines 7 et 8	8, 24	2
Domaines 5 et 7	24, 63	2
Domaines 2 et 5	24, 42	2
Modèles transversaux ou génériques		
Domaines 1 et 6	4, 7, 9, 24, 33, 47, 49	7
Domaines 2 et 6	4, 24, 47	3
Domaines 1 et 7	24, 49	2

Plusieurs constats peuvent être faits à partir de ce tableau. En premier lieu, on remarque que les deux pôles de la géographie et de la physique, bien que prédominants, totalisent un nombre inégal de modèles :

- le premier pôle regroupe, hors redondances, un ensemble total de 30 modèles (ID 1, 3, 4, 6, 7, 9, 12, 16, 19, 20, 21, 22, 24, 27, 30, 31, 32, 33, 39, 40, 46, 47, 51, 52, 56, 57, 59, 60, 62, 64) ;
- le deuxième pôle contient quant à lui 21 modèles (ID 4, 7, 8, 14, 15, 17, 18, 23, 24, 33, 42, 43, 45, 47, 49, 50, 51, 52, 58, 61, 63) ;
- il existe par ailleurs 7 modèles communs aux deux groupes (ID 4, 7, 24, 33, 47, 51, 52), dont la plupart se retrouvent dans les modèles de la troisième catégorie (modèles dits transversaux ou génériques) ;
- enfin, 20 modèles de l'inventaire ne sont pas représentés dans ces groupes (ID 2, 5, 10, 11, 13, 25, 26, 28, 29, 34, 35, 36, 37, 38, 41, 44, 48, 53, 54, 55). Ce sont les modèles qui s'inscrivent dans un domaine unique (ou avec le domaine « Autre ») et qui échappent de fait au comptage par combinaisons. Ces modèles

se répartissent comme suit : 2 en géographie (ID 25, 55), 4 en transports (ID 2, 5, 28, 38), 2 en réseaux techniques (ID 29, 53), 8 modèles en physique (ID 10, 11, 13, 26, 35, 37, 44, 54), 3 en morphologies urbaines (ID 34, 41, 48) et 1 modèle dans le domaine « autres » (ID 36).

Au total, hors redondances entre les groupes et en tenant compte des modèles à domaine unique, on observe une organisation bipolaire remarquable des modèles dans l'inventaire, entre un pôle articulé autour du domaine de la géographie et comprenant l'économie urbaine et les transports, et un pôle articulé autour de la physique et comprenant les domaines des réseaux techniques et des risques. Les modèles de morphologies se répartissent alors entre ces pôles. On note qu'il est difficile de savoir si cette organisation résulte de problématiques ou de méthodes communes, ou bien d'un effet d'attraction académique entre les sciences sociales d'un côté, et les sciences de la nature de l'autre.

Un autre enseignement à tirer de ce tableau concerne le statut du domaine des morphologies urbaines. Il apparaît que pour, chacun des pôles, l'association principale entre le moteur du pôle (géographie ou physique) et un autre domaine concerne avant tout les morphologies urbaines (15 citations pour la géographie, 10 pour la physique). On peut expliquer ce fait de deux manières. En premier lieu, on remarquera que certains des thèmes inscrits dans le domaine des morphologies, comme « Tissus urbains, architecture urbaine » ou « Urbanisme, développement urbain », peuvent avoir une portée très large et traverser facilement les frontières disciplinaires ; ils font d'ailleurs partie des thèmes les plus cités, tous domaines confondus, ce qui explique en grande partie le résultat constaté (cf. § 2.1.2). En second lieu, on peut également penser que le domaine lui-même constitue un regroupement artificiel de sujets très divers qui recouvrent, autant que des thématiques scientifiques, des questions d'outillage informatique utilisables dans presque tous les domaines (modèle de terrain, télédétection / radar, imagerie urbaine, par exemple). Dès lors, il semble normal que ce domaine échappe à la structure bipolaire entre géographie et physique et qui plus est, qu'ils s'inscrive exactement à l'interface des deux pôles en s'associant de manière privilégiée aux principaux domaines formant ces pôles.

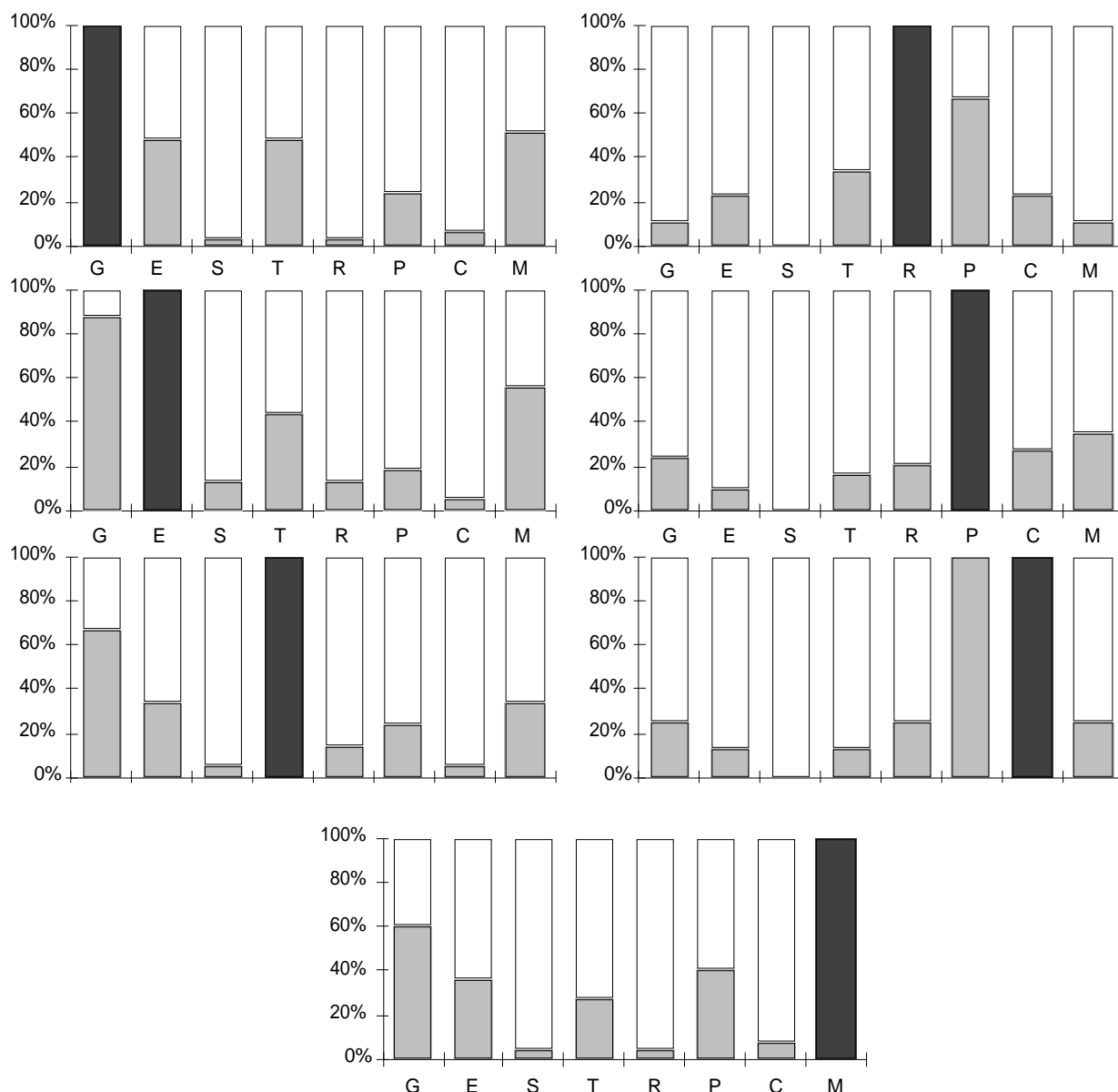
• **Attractivité réciproque des domaines**

Il est possible de confirmer les résultats précédents en adoptant un autre mode de comptage des regroupements pas domaines. Ainsi, nous pouvons noter pour chaque domaine, la part des modèles de ce domaine également inscrits dans chacun des autres domaines de l'inventaire. Nous obtenons ainsi une image de l'attractivité des autres domaines pour les modèles d'un domaine donné. Les synthèses de ces résultats, sous forme de pourcentages de modèles par domaines, sont représentées dans les graphiques page suivante.

On note que les domaines de l'économie, des transports et des morphologies exercent une forte attraction pour les modèles de la géographie (50 % des modèles inscrits en géographie le sont également dans ces trois domaines). Cette attraction est réciproque pour les modèles des domaines de l'économie des transports (près de 70 % des modèles des transports s'inscrivent également en géographie). Le pôle géographie, économie et transports, appuyé par le domaine des morphologies, semble donc bien constitué.

De même, une attraction réciproque s'exerce entre les domaines de la physique, des réseaux et des risques. Par exemple, tous les modèles inscrits dans le domaine des risques le sont également dans celui de la physique. 70 % de ceux du domaine des réseaux s'inscrivent également en physique. Là encore, le pôle défini autour de la physique semble bien défini.

Les deux colonnes de la figure reproduisent ainsi l'organisation bipolaire des modèles de l'inventaire. En dessous, on note que le domaine des morphologies urbaines est attiré par les deux pôles, avec une « préférence » cependant pour les domaines du pôle géographie.



Attractivité des domaines entre eux. Sur chaque graphique, pourcentage des modèles du domaine hachuré foncé également inscrits dans le domaine hachuré clair

• Construction des pôles

En reprenant les éléments ci-dessus, nous proposons de rassembler les modèles inventoriés en deux pôles disjoints, complétés d'un ensemble réduit de modèles ne satisfaisant pas les conditions d'appartenance à l'un de ces pôles. Nous appelons *pôle géographie* l'ensemble des modèles de l'inventaire qui s'articulent préférentiellement autour du domaine de la géographie, et *pôle physique* l'ensemble de ceux qui s'articulent autour du domaine de la physique.

Nous utiliserons très souvent ces ensembles dans les comptages et analyses de ce rapport. Nous verrons d'ailleurs que nombreux sont les critères pour lesquels on observe des divergences fondamentales entre les pôles. C'est pourquoi il paraît important de préciser ici les modalités pratiques qui nous ont permis de constituer ces ensembles. Les voici donc.

Nous partons de l'analyse des recoupements par domaines qui nous a conduit à définir les ensembles de modèles suivants :

- Autour de la géographie, 30 modèles ID 1, 3, 4, 6, 7, 9, 12, 16, 19, 20, 21, 22, 24, 27, 30, 31, 32, 33, 39, 40, 46, 47, 51, 52, 56, 57, 59, 60, 62, 64.
- Autour de la physique, 21 modèles ID 4, 7, 8, 14, 15, 17, 18, 23, 24, 33, 42, 43, 45, 47, 49, 50, 51, 52, 58, 61, 63
- 6 modèles transversaux ID 4, 7, 9, 24, 33, 47

7 modèles sont communs aux deux premiers ensembles (ID 4, 7, 24, 33, 47, 51, 52). Ils font tous partie de l'ensemble des modèles transversaux, sauf les ID 51, 52. Par ailleurs, 20 modèles inventoriés n'appartiennent pas à ces groupes pour des raisons citées plus haut (ID 2, 5, 10, 11, 13, 25, 26, 28, 29, 34, 35, 36, 37, 38, 41, 44, 48, 53, 54, 55). Nous les appelons « modèles isolés » et ils se répartissent comme suit :

- 2 en géographie (ID 25, 55)
- 4 en transports (ID 2, 5, 28, 38)
- 2 en réseaux techniques (ID 29, 53)
- 8 en physique (ID 10, 11, 13, 26, 35, 37, 44, 54)
- 3 en morphologies urbaines (ID 34, 41, 48)
- 1 modèle dans le domaine « autres » (ID 36).

A partir de ces données, nous consolidons l'ensemble des modèles articulés autour du domaine de la géographie (ci-dessus), en le privant des modèles communs et en le complétant par les modèles isolés des domaines de la géographie et des transports. Nous obtenons alors la liste des 29 modèles suivants : ID 1, 2, 3, 5, 6, 9, 12, 16, 19, 20, 21, 22, 25, 27, 28, 30, 31, 32, 38, 39, 40, 46, 55, 56, 57, 59, 60, 62, 64.

Nous procédons de la même manière pour consolider l'ensemble des modèles articulés autour du domaine de la physique, en le privant des modèles communs et en le complétant par les modèles isolés des domaines de la physique et des réseaux techniques. Nous obtenons alors la liste des 24 modèles suivants : ID 8, 10, 11, 13, 14, 15, 17, 18, 23, 26, 29, 35, 37, 42, 43, 44, 45, 49, 50, 53, 54, 58, 61, 63.

Ils nous reste alors dans l'inventaire 11 modèles isolés, à savoir les ID 4, 7, 24, 33, 34, 36, 41, 47, 48, 51, 52. L'examen des descriptions de ces modèles montre que les ID 51 et 52 concernent presque exclusivement des questions d'hydrologie. Nous les replaçons donc dans le pôle physique. Nous faisons de même pour l'ID 7 qui aborde des questions de thermique urbaine, de lumière et d'aménagement, ainsi que pour l'ID 47 qui traite de micro-climatologie urbaine. A l'inverse, le modèle ID 33 aborde des questions de transports, avec une préoccupation en matière de pollution de l'air. Nous le plaçons dans le pôle géographie.

Ces regroupements nous conduisent alors à définir un découpage de l'inventaire en trois ensembles disjoints qui sont définis comme suit :

- **Pôle géographie (30 modèles)** : ID 1, 2, 3, 5, 6, 9, 12, 16, 19, 20, 21, 22, 25, 27, 28, 30, 31, 32, 33, 38, 39, 40, 46, 55, 56, 57, 59, 60, 62, 64
- **Pôle physique (28 modèles)** : ID 7, 8, 10, 11, 13, 14, 15, 17, 18, 23, 26, 29, 35, 37, 42, 43, 44, 45, 47, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 58, 61, 63
- **Autres (6 modèles)** : ID 4, 24, 34, 36, 41, 48

On notera que les 6 modèles autres sont tous liés à la synthèse d'image ou à l'analyse de formes urbaines, c'est-à-dire au domaine des morphologies urbaines. La difficulté de leur classement confirme nos conclusions précédentes sur ce domaine.

On insiste également sur le fait que, contrairement au regroupement par domaines, le regroupement par pôles proposé ici classe les 64 modèles inventoriés en trois ensembles disjoints pour lesquels les analyses statistiques sont sans doute plus faciles et plus pertinentes que pour les ensembles à intersection non vide que constituent les domaines.

2.1.2 Analyse par thèmes

Les 8 domaines proposés dans le questionnaire sont segmentés en thèmes représentatifs. En complément de la répartition par domaines, on peut s'intéresser à la distribution des modèles dans les différents thèmes de chacun des domaines. Il est possible en particulier de donner une hiérarchie générale des thèmes suivant le nombre de citations de chacun d'eux, ou encore d'étudier les relations entre les thèmes des différents domaines.

• Hiérarchie générale

On peut dans un premier temps dresser un classement général des thèmes les mieux représentés dans l'inventaire. Le tableau ci-dessous montre ainsi le nombre de citations de chacun des thèmes, tous domaines confondus (nombre de citations supérieur ou égal à 3).

On retrouve ici, au travers des thèmes (de manière qualitative et sémantique), un découpage analogue à celui construit à partir des combinaisons de domaines, à savoir : le regroupement des modèles en deux pôles, l'un articulé autour des questions de géographie, d'économie et gestion urbaine et de transports ; l'autre autour des thèmes de la physique urbaine, des réseaux techniques et des risques. Seuls deux des thèmes de la liste ne rentrent pas directement dans ces pôles. Ce sont ceux qui concernent les systèmes d'information géographique et l'imagerie urbaine, que l'on pourrait classer dans une catégorie transversale de type « outils pour la modélisation ».

17	<i>Réseau de transport intra-urbain</i>
14	<i>Mobilité quotidienne</i>
14	<i>Climatologie urbaine</i>
13	<i>Aéraulique, pollution de l'air</i>
12	<i>Tissus urbains, architecture urbaine</i>
11	<i>Localisation des activités</i>
11	<i>Demande de transport</i>
11	<i>Urbanisme, développement urbain</i>
9	<i>Dynamique spatiale intra-urbaine</i>
9	<i>Systèmes d'information géographique</i>
9	<i>Choix modal</i>
8	<i>Choix résidentiels</i>
8	<i>Gestion urbaine</i>
8	<i>Réseaux de transport inter-urbain</i>
8	<i>Eau / Eaux usées / Assainissement</i>
8	<i>Thermique et énergétique urbaine</i>
8	<i>Imagerie urbaine</i>
7	<i>Hydrologie / Pollution de l'eau</i>
7	<i>Acoustique urbaine</i>
6	<i>Utilisation du sol</i>
6	<i>Dynamique des systèmes de villes</i>
5	<i>Éclairage naturel et artificiel</i>
4	<i>Interconnexion</i>
4	<i>Végétation</i>
4	<i>Risques naturels</i>
4	<i>Risques industriels</i>
4	<i>Modèles de terrain</i>
3	<i>Marché foncier et immobilier</i>

Cela étant, on note dans la liste la forte présence des thèmes relatifs aux transports. Ainsi, au moins 4 thèmes de la liste sont directement liés aux transports, dont le premier en nombre de citations (réseau de transport intra-urbain). De même, de nombreux thèmes présents peuvent également être associés aux transports : soit dans le pôle géographique (mobilité quotidienne, localisation des activités, utilisation du sol), soit dans le pôle physique (aéraulique, pollution de l'air, acoustique urbaine).

Au final, malgré la représentation moyenne dont fait l'objet le domaine proprement dit des transports, en nombre de modèles (21 sur 64), on remarque que les thèmes propres à ce domaine sont prédominants dans l'inventaire et traversent l'ensemble des autres thèmes. Les transports apparaissent ainsi comme une préoccupation transversale de la modélisation urbaine, répondant sans doute en cela aux préoccupations actuelles émanant de la demande sociale, soit dans la structure des réseaux de transports, soit dans les effets des transports en milieu urbain.

• Analyse sémantique

Afin de dépasser le seul comptage systématique des domaines et thèmes représentés et pour approfondir les questions liées au champs de compétence des modèles inventoriés, on peut tenter d'analyser, de manière plus sémantique, les phénomènes que les modèles permettent de simuler ou d'évaluer.

Le champ n° 30 du questionnaire Inventur pose précisément cette question. Il s'agit d'un champ de type texte auquel tous les modèles sauf un (ID 23) apportent une réponse. L'analyse de contenu apparaît délicate, tant sont variés les phénomènes représentés. Cependant, le décompte des occurrences des mots, tous domaines confondus, donne la liste ci-dessous :

```
21 transport
13 reseau(x)
12 permet
10 systeme(s), evolution, simulation
7 pollution, polluant(s)
6 temps, atmosphere, espace(s), fonctionnement, simuler, effets
5 environnement(s), deplacement(s), comportement, compte, echelle, milieu,
  agglomeration, flux, differents, ecoulement(s), impact(s)
4 dynamique(s), phenomenes, population(s), pression(s), niveaux, element(s),
  terme(s), surface, aménagement(s), trafic, activite(s), repartition
3 distribution, prise, dimension(s), evaluer, physique(s), spatiale(s),
  evaluation, infrastructure(s), globale(s), conditions, economique(s),
  taille(s), conduites, collectif(s), charge, simule, vehicules, mobile(s),
  equations, type(s), dispersion, sonores, offre, modification, temperature(s),
  echanges, long, estimation, batiment(s), thermique(s), horizon(s), partir,
  quartier(s), stationnement, construction
```

Le terme « transport » arrive nettement en tête des mots utilisés dans l'ensemble des réponses. Il est suivi de la notion assez proche de « réseau ». La lecture rapide des réponses montre que le terme « transport » peut être utilisé dans plusieurs acceptions, pour désigner les déplacements de voyageurs ou de marchandises (principalement), mais aussi dans les expressions comme « transport de polluants » en physique, ou encore « transport d'eau » dans le domaine des réseaux techniques ; cependant, ces acceptions restent marginales. On note également que les problématiques physiques liées aux questions de transport, comme les problèmes de pollution atmosphérique (14 occurrences cumulées pour « pollution » et « polluants ») ou d'environnement, font l'objet de citations nombreuses.

Au total, la focalisation sur les questions liées aux transports, aux réseaux et aux questions d'évolution confirme les résultats précédents. Ils laissent penser que les problèmes dynamiques à l'échelle de la ville sont au centre des préoccupations de modélisation et, parmi ces problèmes, ceux relatifs aux transports (leur analyse, leur maîtrise ou leurs effets), traversent les domaines disciplinaires.

• Hiérarchie des thèmes par domaines

En complément de l'analyse hiérarchique des thèmes tous domaines confondus, on peut établir la hiérarchie thématique interne à chaque domaine. Conformément aux principes adoptés plus haut, les comptages sont effectués par domaine pour tous les modèles de l'inventaire ayant coché au moins l'un des thèmes du domaine étudié.

Dans le domaine de la géographie, c'est le thème « Mobilité quotidienne » qui est le mieux représenté seul et associé aux autres thèmes du domaine (14 modèles). Suivent le thème SIG plus transversal (9 modèles) et « Dynamique spatiale intra-urbaine » (9 modèles également), puis le thème « Choix résidentiels » (8 modèles au total). Les thèmes « Utilisation du sol » et « Dynamique des systèmes de villes » recueillent 6 modèles chacun. On note que ces thèmes sont bien représentés isolément et peu souvent associés entre eux (2 occurrences au maximum pour une association de 2 ou 3 thèmes parmi ceux du domaine).

Dans le domaine de l'économie et de la gestion urbaine, les questions de « Localisations des activités », par ailleurs proches des thèmes géographiques, sont les mieux représentées (11 modèles). Le thème générique « Gestion urbaine » suit avec 8 modèles. Les autres thèmes « Marché foncier et immobilier » et « Marché du travail » recueillent respectivement 3 et 2 modèles chacun.

Dans le domaine des transports, les thèmes « Réseaux de transport intra-urbain » (17 modèles) et « Demande de transports » (11 modèles) sont prédominants. Suivent les thèmes « Choix modal » (9 modèles) et « Réseaux de transport inter-urbain » (8 modèles). Les autres thèmes « Interconnexion » (4 modèles) et « Logistique » (2 modèles) sont plus pauvrement représentés. On remarque que les trois premiers thèmes cités sont souvent associés (5 occurrences). De manière générale, les thèmes du domaine sont très rarement représentés isolément et très souvent associés par deux et par trois. Ceci conduit à penser que la segmentation thématique proposée pour ce domaine n'est peut-être pas satisfaisante.

Dans le domaine des réseaux techniques, les problèmes hydrologiques sont les mieux représentés (8 modèles). Les thèmes « Réseaux hertziens, télécommunications » et « Réseaux de collecte de déchets urbains » recueillent un modèle chacun tandis que les autres thèmes du domaine ne sont pas du tout représentés (voir ci-dessous).

Dans le domaine de la physique, les thèmes les plus cités sont « Climatologie urbaine » (14 modèles) et « Aéraulique / Pollution de l'air » (13 modèles). Les autres thèmes sont tous représentés : « Thermique et énergétique urbaine » (8 modèles), « Hydrologie, pollution de l'eau » et « Acoustique urbaine » (7 modèles chacun), « Éclairage naturel et artificiel » (5 modèles), « Végétation » (4 modèles), et enfin « Sols, mécanique des sols et pollution des sols » (2 modèles). Les deux premiers thèmes concernant la climatologie et la pollution de l'air sont souvent associés (9 occurrences). Les autres associations de deux ou trois thèmes sont plus rares et elles ne concernent qu'un modèle à chaque fois.

Dans le domaine des risques, 4 modèles couvrent chacun les thèmes « Risques naturels » et « risques industriels ». Le thème des « Risques épidémiologiques ou toxicologiques » n'est représenté que par un modèle.

Enfin, dans le domaine des morphologies urbaines, les thèmes les mieux représentés sont les plus généraux : « Tissus urbains / Architecture urbaine » (12 modèles) et « Urbanisme / Développement urbain » (11 modèles). Suivent les thèmes « Imagerie urbaine » (8 modèles) et « Modèles de terrain » (4 modèles). Les autres thèmes ne sont représentés qu'une seule fois : « Modèles fractals », « Télédétection / Radar » et « Photogrammétrie, reconstruction 3D ». On note que dans ce domaine, les thèmes sont le plus souvent représentés isolément, les associations de 2, 3 voire 4 thèmes ne concernant à chaque fois qu'un seul modèle.

• **Thèmes mal représentés**

En complément des éléments précédents, nous donnons ici la liste des thèmes qui ne sont pas du tout ou très mal représentés dans l'inventaire, tous domaines confondus. Le tableau ci-après (page suivante) répertorie ainsi les thèmes qui font l'objet d'une citation au plus, sur l'ensemble des 64 modèles (hors thèmes de type « Autres »).

1	<i>Réseaux sociaux</i>
1	<i>Intégration / Exclusion</i>
1	<i>Réseaux hertziens / Télécommunications</i>
1	<i>Réseaux de collecte de déchets urbains</i>
1	<i>Risques épidémiologiques ou toxicologiques</i>
1	<i>Modèles fractals</i>
1	<i>Téledétection / Radar</i>
1	<i>Photogrammétrie / Reconstruction 3D</i>
0	<i>Géomarketing</i>
0	<i>Criminalité / Violence</i>
0	<i>Électricité</i>
0	<i>Réseaux de chaleur</i>
0	<i>Réseaux de transport de gaz</i>

Naturellement, les trois thèmes du domaine de la sociologie, lui-même très peu représenté, appartiennent à cette liste. Hormis ceux-ci, on note que les autres thèmes pas ou mal représentés appartiennent majoritairement au domaine des réseaux techniques. Dans ce domaine, seul le thème relatif aux réseaux d'eau et d'assainissement est bien représenté (8 citations au total).

On remarque également que certains thèmes qui font pourtant l'objet de travaux de modélisation ne sont pas du tout ou très mal représentés dans l'inventaire : le géomarketing, la photogrammétrie ou encore la téledétection par exemple.

• **Autres thèmes proposés**

Pour chaque domaine, le questionnaire laisse la possibilité de proposer de nouveaux thèmes si les thèmes prédéfinis ne conviennent pas. Par ailleurs, un champ « Autres domaines » (28) et un champ rattaché « Autres thèmes des autres domaines » (29) peuvent encore servir à compléter la description.

Dans le domaine de la géographie, deux autres thèmes sont proposés : « croissance des végétaux urbains » (AMAP) et « généralisation de données urbaines » (STRATEGE). Le premier peut se rapporter au thème 8 de la physique. Le deuxième apparaît comme une problématique particulière plutôt qu'une thématique de la modélisation du champ urbain.

Dans le domaine de l'économie, le thème « localisations des activités commerciales » est proposé (MINOU). On peut le rapprocher du thème général « localisations des activités ».

En sociologie, le thème « ségrégation » est proposé (GARIN-LOWRY). Peut-on rattacher cette proposition au thème « Intégration / Exclusion » ?

Dans le domaine des transports, plusieurs thèmes nouveaux sont proposés :

- Stationnement (SUPERNOVA)
- Motorisation des ménages (Modèle démographique de projection à long terme...)
- Temps de parcours (MINOU)
- Logistique urbaine et planification urbaine (FRETURB)
- Choix d'itinéraire, temps de transport, charge des réseaux (MODUS)

Le thème « Logistique » est déjà proposé. Les questions de motorisation des ménages ne semblent pas constituer (sous réserve d'expertise) une thématique propre de la modélisation. Les thèmes « temps de parcours » et « choix d'itinéraires » pourraient sans doute être regroupés et ajoutés au domaine, comme d'ailleurs le thème « stationnement ».

Aucun autre thème n'est proposé dans le domaine des réseaux techniques ni dans celui de la physique. Pour ce qui concerne le domaine des risques, sont proposés les thèmes « stabilité de terrains » (CESAR-LCPC) et « rejets atmosphériques accidentels » (SUBMESO). Le

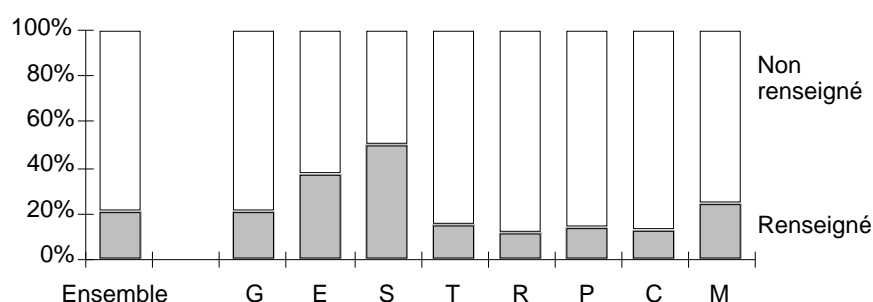
premier pourrait sans doute être ajouté au domaine (il se différencie selon nous des questions relatives aux risques naturels dans le champ urbain). Le deuxième nous semble rattaché au thème des risques épidémiologiques ou toxicologiques.

Enfin, dans le domaine des morphologies urbaines, trois thèmes sont proposés :

- Architectures des espaces urbains (SIMOE)
- Analyse et reconnaissance des formes de l'espace urbain (Morphométrie et classification automatique)
- Analyse des tissus urbains (STRATEGIE)

La première proposition se rattache aux thèmes existants. Un nouveau thème « Analyse et reconnaissance des formes urbaines » pourrait effectivement être ajouté au domaine.

Le champ « Autres domaines concernés par le modèle » (28) est renseigné par plus de 20 % des modèles (graphique ci-dessous). Hormis le domaine de la sociologie (non représentatif), la tendance à ne pas se satisfaire des domaines et thèmes proposés (et donc à proposer d'autres domaines et thèmes) semble plus forte dans le domaine de l'économie urbaine, de la morphologie et de la géographie.



État des réponses au champ 28

Les autres domaines proposés sont les suivants :

- Paysagisme urbain, choix participatifs des résidents (AMAP)
- Aménagement du Territoire (SIMRES)
- Calcul des ouvrages d'art : Mécanique des Sols, hydrologie (CESAR-LCPC)
- Gestion urbaine (Negoce)
- Gestion urbaine, stratégies municipales (SIMURB)
- Modélisation et simulation du comportement humain (piéton, conducteur de véhicule, cycliste, ...) (HPTS)
- Financement des réseaux de transports collectifs urbains (QUINQUIN)
- Urbanisme commercial (MINOU)
- Aménagement urbain (SOLENE - ACCESSIBILITE VISUELLE)
- Simulations d'illuminations (MODLUM)

On note d'emblée qu'il s'agit de thèmes particuliers plutôt que de domaines de recherche, comparables aux huit domaines prédéfinis. Plusieurs de ces propositions recourent des thèmes proposés dans le questionnaire. Cependant, il nous semble que l'on peut retenir les suggestions originales suivantes : le thème « Paysagisme urbain » à rajouter dans le domaine des morphologies urbaines, le thème « Ouvrages d'art » à rajouter dans le domaine de la physique, le thème « Comportement humain » à ajouter dans le domaine de la sociologie (à élargir à la Psycho-sociologie par exemple), le thème « Financement des infrastructures et réseaux » et le thème « Urbanisme commercial », tous deux à ajouter dans le domaine de l'économie et de la gestion urbaine.

Enfin, dans le champ 29 « Autres thèmes des autres domaines », nous recueillons les cinq propositions suivantes :

- Physique urbaine, consommation énergétique des bâtiments, morphologie urbaine - études d'impact visuel (TOWNSCOPE)
- Accessibilité visuelle, Scénographie urbaine (SOLENE - SIMULATION DE L'ACCESSIBILITE VISUELLE)
- Le modèle concerne la simulation du transport et de l'évolution d'une quantité réactive (un désinfectant) en réseau d'eau potable. Il peut également être adapté au cas de produits non réactifs ou de polluants infiltrés dans un réseau d'eau potable (EQUARESEAU)
- Cartographie du tissu urbain (STRATEGE)
- Positionnement des sources lumineuses et prévisualisation de leur effet (MODLUM)

Nous retenons de ces propositions le thème « Impact visuel » qui peut être associé au thème du paysagisme urbain ajouté plus haut au domaine des morphologies urbaines, ainsi que le thème « Cartographie », qui peut être associé au thème SIG du domaine de la géographie.

Au final, après l'exploration de toutes les suggestions faites *via* l'inventaire, et sous réserve d'une expertise plus approfondie par domaine, nous pouvons constituer le tableau corrigé ci-dessous. Les ajouts et corrections dans chaque domaine sont en italiques.

<p>Géographie et dynamique spatiale</p> <p>Dynamique spatiale intra-urbaine Mobilité quotidienne Choix résidentiels Utilisation du sol Dynamique des systèmes de villes <i>Cartographie / SIG</i> Géomarketing</p> <p>Économie et gestion urbaine</p> <p>Marché foncier et immobilier Marché du travail Gestion urbaine Localisations des activités <i>Urbanisme commercial</i> <i>Financement des infrastructures et réseaux</i></p> <p>Psycho-Sociologie</p> <p>Réseaux sociaux Intégration / Exclusion Criminalité / Violence <i>Comportement humain</i></p> <p>Transports</p> <p>Demande de transport Choix modal Logistique Interconnexion Réseaux de transport intra-urbain Réseaux de transport inter-urbain <i>Temps de parcours / Choix d'itinéraires</i> <i>Stationnement</i></p>	<p>Réseaux techniques</p> <p>Eau / Eaux usées / Assainissement Électricité Réseaux hertziens / Télécommunications Réseaux de chaleur Réseaux de transport de gaz Réseaux de collecte de déchets urbains</p> <p>Physique urbaine</p> <p>Climatologie urbaine Aéraulique / Pollution de l'air Hydrologie / Pollution de l'eau Sols / Mécanique des sols / Pollution des sols <i>Ouvrages d'art</i> Thermique et énergétique urbaine Acoustique urbaine Éclairage naturel et artificiel Végétation</p> <p>Risques et cindyniques</p> <p>Risques naturels <i>Sols / Stabilité des sols</i> Risques épidémiologiques ou toxicologiques Risques industriels</p> <p>Morphologies urbaines</p> <p>Modèles de terrain Tissus urbains / Architecture urbaine Urbanisme / Développement urbain Modèles fractals Télédétection / Radar Photogrammétrie / Reconstruction 3D Imagerie urbaine <i>Analyse et reconnaissance des formes urbaines</i> <i>Impact visuel / Paysagisme urbain</i></p>
--	---

Domaines et champs corrigés (ajouts et corrections en italiques)

2.1.3 Conclusion

• Sur les domaines

Le questionnaire Inventur propose 8 domaines et 44 thèmes associés à ces domaines. Nous considérons qu'un modèle appartient à l'un des 8 domaines si, pour ce modèle, au moins un thème du domaine est coché. Un modèle appartient donc en général à plusieurs domaines.

Ce principe établi, le décompte des modèles par domaines laisse entrevoir des situations inégales. Si tous les domaines proposés sont représentés par au moins un modèle, ceux de la géographie et de la physique arrivent largement en tête (29 modèles chacun), suivis des domaines des morphologies urbaines (25 modèles), des transports (21 modèles), de l'économie et la gestion urbaine (16). Les domaines des réseaux techniques et des risques sont globalement peu représentés (respectivement 9 et 8 modèles). Celui de la sociologie est très mal représenté (2 modèles seulement abordent les thématiques correspondantes). Par la suite, les résultats associés à ce domaine n'auront donc aucune représentativité.

En première analyse, les modèles semblent fortement pluridisciplinaires puisque qu'ils s'inscrivent en moyenne dans plus de 2 domaines à la fois. La part des modèles monothématiques au sein de chaque domaine, c'est-à-dire le nombre de modèles n'appartenant qu'à ce domaine, est d'ailleurs très faible pour tous les domaines et, notamment, dans celui de la géographie. De manière générale, le quart des modèles s'inscrivent dans un domaine unique (avec plusieurs sous-thèmes dans ce domaine, éventuellement). Plus du tiers des modèles s'inscrivent au croisement de deux domaines, et plus de 20 % au croisement de trois domaines. On note également 14 % des modèles s'inscrivant dans quatre domaines à la fois, sans parler des quelques modèles qui affichent des compétences dans cinq, voire sept domaines.

Cependant, cette forte pluridisciplinarité apparente cache un ordre plus rigoureux. En effet, près de la moitié des modèles s'inscrivent en partie ou complètement dans les domaines de la géographie ou de la physique, ceux-ci constituant deux pôles d'attraction agrégeant autour d'eux des thématiques disparates. Plusieurs analyses confirment ainsi l'organisation bipolaire remarquable des modèles de l'inventaire, entre un pôle articulé autour du domaine de la géographie et comprenant l'économie urbaine et les transports, et un pôle articulé autour de la physique et comprenant les domaines des réseaux techniques et des risques. Les modèles du domaine des morphologies urbaines se répartissent entre ces pôles, ce qui laisse penser que ce domaine constitue un regroupement plus ou moins artificiel de sujets divers, qui s'inscrivent à l'interface des 2 pôles, en s'associant de manière privilégiée aux principaux domaines formant ces pôles.

Ces constats nous conduisent alors à définir un découpage de l'inventaire en trois ensembles disjoints qui sont définis comme suit : le pôle géographie (30 modèles, ID 1, 2, 3, 5, 6, 9, 12, 16, 19, 20, 21, 22, 25, 27, 28, 30, 31, 32, 33, 38, 39, 40, 46, 55, 56, 57, 59, 60, 62, 64), le pôle physique (28 modèles, ID 7, 8, 10, 11, 13, 14, 15, 17, 18, 23, 26, 29, 35, 37, 42, 43, 44, 45, 47, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 58, 61, 63), les autres modèles (ID 4, 24, 34, 36, 41, 48). Nous utiliserons très souvent ces ensembles pour les comptages et analyses qui suivent dans ce rapport.

• Sur les thèmes

L'analyse de la distribution des modèles dans les thèmes des différents domaines montre un découpage analogue à celui construit à partir des combinaisons de domaines, à savoir : le regroupement des modèles en deux pôles, l'un articulé autour des questions de géographie, d'économie et gestion urbaine et de transports ; l'autre autour des thèmes de la physique urbaine, des réseaux techniques et des risques.

Cela étant, on note parmi les thèmes les mieux représentés, tous domaines confondus, la forte présence des thèmes relatifs aux transports. Ainsi, au moins 4 thèmes parmi les mieux représentés sont directement liés aux transports, dont le premier en nombre de citations (réseau de transport intra-urbain). De même, nombreux sont les thèmes parmi les plus cités qui peuvent également être associés aux transports, soit dans le pôle géographique (mobilité quotidienne, localisation des activités, utilisation du sol), soit dans le pôle physique (aéroulque, pollution de l'air, acoustique urbaine).

Au total, malgré la représentation moyenne dont fait l'objet le domaine proprement dit des transports en nombre de modèles (21 sur 64), on remarque que les thèmes propres à ce domaine sont prédominants dans l'inventaire et traversent l'ensemble des autres thèmes. Les transports apparaissent ainsi comme une préoccupation transversale de la modélisation urbaine, répondant sans doute en cela aux préoccupations actuelles émanant de la demande sociale, soit dans la structure des réseaux de transports, soit dans les effets des transports en milieu urbain, dont la pollution et le bruit.

Une analyse plus sémantique des phénomènes que les modèles permettent de simuler ou d'évaluer corrobore ces conclusions : le mot « transport » arrive nettement en tête des termes les plus souvent utilisés dans l'ensemble des réponses ; il est suivi de la notion proche de « réseau ». Les acceptions comptabilisées concernant les transport de polluants en physique, ou le transport d'eau dans le domaine des réseaux techniques, restent marginales. Le « phénomène transport » semble bien traverser l'inventaire dans son état actuel et être placé au centre de toutes les préoccupations de la modélisation du champ urbain, quels que soient les domaines.

On note enfin que l'inventaire comporte également des thèmes qui sont pas du tout ou très mal représentés. Naturellement, les trois thèmes du domaine de la sociologie, lui-même très peu représenté, appartiennent à ce groupe. Hormis ceux-ci, les autres thèmes pas ou mal représentés appartiennent majoritairement au domaine des réseaux techniques. On remarque également que certains thèmes qui font pourtant l'objet de travaux de modélisation connus par ailleurs ne sont pas du tout ou très mal représentés dans l'inventaire : le géomarketing, la photogrammétrie ou encore la télédétection par exemple.

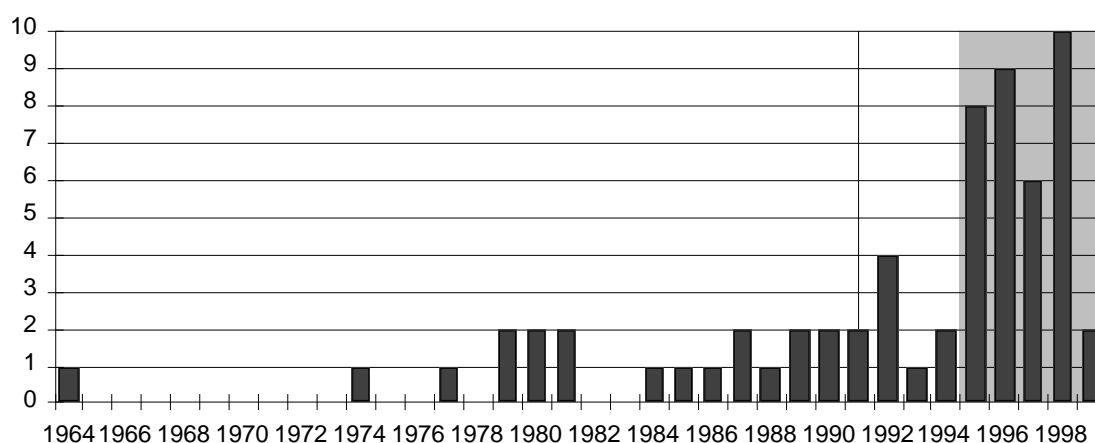
D'autres thèmes sont également proposés par les rédacteurs du questionnaire. Après analyse, seuls quelques-uns d'entre eux paraissent pouvoir être ajoutés à la structure initiale du questionnaire.

2.2 Évolution temporelle

2.2.1 Bilan général

Le graphique ci-dessous montre la distribution des modèles par année de création. En premier lieu, on note que les préoccupations en matière de modélisation urbaine sont anciennes (1964). Par ailleurs, on observe une production régulière de modèles depuis au moins 20 ans (de 1979 à 1999, sauf les années 1982 et 1983).

On note également une très forte progression de la production de modèles depuis le début des années 90, si bien que, tous domaines confondus, la moyenne d'âge des modèles inventoriés est aujourd'hui de huit ans (année moyenne de création : 1991). Par ailleurs, la forte progression récente conduit à une médiane située en 1995. Dit autrement, plus de la moitié des modèles inventoriés ont été créés entre 1995 et 1999. Ce constat dénote un fort engouement actuel pour les activités de modélisation du champ urbain, que l'on peut lier par ailleurs à une certaine démocratisation des outils de calcul numérique et de développement informatique depuis le milieu des années 90.



*Évolution du nombre de modèles inventoriés suivant l'année de création
(ensemble des modèles)*

• Antécédents

Cependant, l'interprétation de ces résultats peut être discutée puisque l'on peut considérer que la méthodologie choisie pour l'inventaire a conduit de jeunes modélisateurs à présenter leurs modèles, notamment pour les faire connaître (résultat d'un travail de thèse par exemple), alors même que ces modèles récents ne passeront peut-être pas l'épreuve du temps en comparaison des productions plus anciennes. On serait ainsi conduit à penser que la forte progression constatée ces dernières années pourrait être un effet de la méthode d'inventaire et, dès lors, constituer une certaine amplification de la réalité.

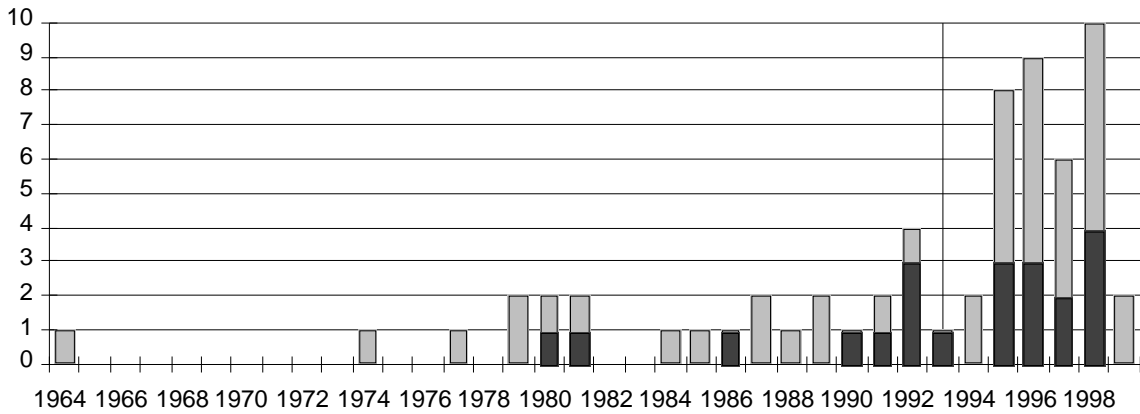
Pour lever ce doute, on peut s'interroger sur les antécédents des modèles décrits. Le champ 47 du questionnaire Inventur cherche à savoir si le modèle proposé est lié directement à un ou plusieurs autres modèles développés antérieurement. Ce champ est renseigné par environ

60 % des modèles (37 sur 64) dont une partie répondent par la négative. Il reste au final 23 réponses affirmatives (environ 35 % du total) pour lesquelles une analyse permet de dresser le tableau ci-dessous des modèles que nous appelons « dérivés ».

- *TRANUS est dérivé d'un modèle de trafic à 4 étapes pour la conception de la partie transport du modèle*
- *TOWNSCOPE est dérivé de CAM.UR (Computer Aided Management System for Urban Renewal), développé dans le cadre du programme "CCE-DGXII, 3rd European R&D non nuclear energy programme, PASTOR sub-programme*
- *CESAR-LCPC est dérivé de Rosalie (LCPC)*
- *Le Modèle démographique de projection à long terme... est dérivé des modèles de motorisation et de kilométrages développés à partir de 1986 au niveau national puis régional*
- *SOLENE-THERMIQUE est lié a SOLENE - Solaire*
- *MERCURE est une version dérivée du code ESTET développé par le Laboratoire National d'Hydraulique*
- *AZUR est un système logiciel comprenant le code MERCURE pour le calcul des champs atmosphériques, le code AIRQUAL pour le transport réactif, MIEL pour le modèle d'émission de polluants*
- *HYDROWORKS est dérivé de FLUPOL (1988) et de MOSQUITO (1989)*
- *ANTONIN est dérivé du « Modèle National Hollandais » (NMS) développé à la fin des années 80 par Hague Consulting Group pour le Ministère des Transports Hollandais)*
- *SIMURB est dérivé de SIMRES (1993-95)*
- *Le Modèle intra-urbain de Peter Allen est dérivé du Modèle dynamique des lieux centraux (P. Allen, M. Sanglier) et du modèle de Lowry*
- *Bussière amendé est dérivé du modèle de localisation résidentielle de René Bussière, 1972*
- *IDOS est inspiré d'une méthodologie basée sur des modèles analogiques permettant la visualisation de scènes urbaines composites, développée par l'Institut de Géoarchitecture au cours des années 1980*
- *SOLENE - SIMULATION SOLAIRE s'inscrit dans une continuité de recherche depuis 1976*
- *SOLENE - SIMULATION DE L'ACCESSIBILITE VISUELLE utilise largement les procédures développées dans SOLENE (Simulation solaire)*
- *SOLENE - SIMULATION DE L'ECLAIREMENT NATUREL utilise les procédures de visibilité dans une scène développées dans SOLENE (Simulation solaire) et des modules d'évaluation de facteurs de forme (1994)*
- *Le modèle ADAPTATION DU MODELE DE POTENTIEL est dérivé du Potentiel de population (Stewart & Warntz, 1958)*
- *Le modèle Géométrie aléatoire et réseaux de télécommunication est lié lié aux travaux d'un ingénieur hongrois (G. Sallaï) qui avait établi en 1981, de façon très empirique, un modèle de réseau de télécommunications, où les noeuds techniques était répartis aléatoirement sur le territoire.*
- *SUBMESO est lié à ARPS 3.0 (CAPS, University of Oklahoma, 1992) pour la partie Dynamique, aux modèles de Kessler et Berry-Reinhardt pour la partie Micro-physique, et au modèle MOCA de Aumont (1994) pour la partie Chimie.*
- *MAP et NOD est inspiré des travaux de Ph Mathis avec son modèle D-LOCAT développé dans les années 80*
- *MODLUM est dérivé de Candela (LORIA - INRIA Lorraine) 1997*
- *UAM-V (Urban Airshed Model with variable grid) est dérivé de UAM contenant le mécanisme chimique CB-II, 1980 et de UAM (mécanisme chimique : CB-IV) pour l'Environmental protection Agency, 1990*
- *RES-DYNAM est lié à D-LOCAT (Philippe Mathis, Université de Tours, 1978)*

En reprenant un à un ces éléments, on peut tenter de superposer la date de création des modèles « dérivés » sur le calendrier général de création des modèles, dans leur ensemble (graphique page suivante). Sur les 23 modèles dérivés (ID 3, 7, 8, 9, 11, 14, 15, 18, 19, 21, 22, 30, 34, 35, 36, 37, 39, 42, 43, 56, 58, 61, 62), deux ne précisent pas leur date de création (ID 3, 39). Pour les autres, l'année moyenne de création est 1993 (1991 pour l'ensemble des modèles). On constate sur la figure qu'une part non négligeable des modèles créés depuis 1992 sont en réalité des reprises de modèles développés précédemment (en noir sur la figure). Les autres modèles (en gris) sont des créations nouvelles de l'année pour laquelle ils sont référencés.

Ces résultats confirme la forte progression constatée depuis cinq ans puisque plus du tiers des modèles récents sont en réalité des reprises de modèles plus anciens, ce qui peut, entre autres choses, gager de leur pérennité. On en vient donc à conclure que la progression récente de la production de modèles serait un mouvement de fond, qui peut sans doute trouver quelques éléments d'explication dans les arguments cités plus haut liés à la puissance et la facilité d'utilisation des ordinateurs depuis quelques années.



*Part des modèles dérivés dans l'ensemble des modèles, par année de création
(part des créations nouvelles et des reprises, par année)*

2.2.2 Évolution par domaines

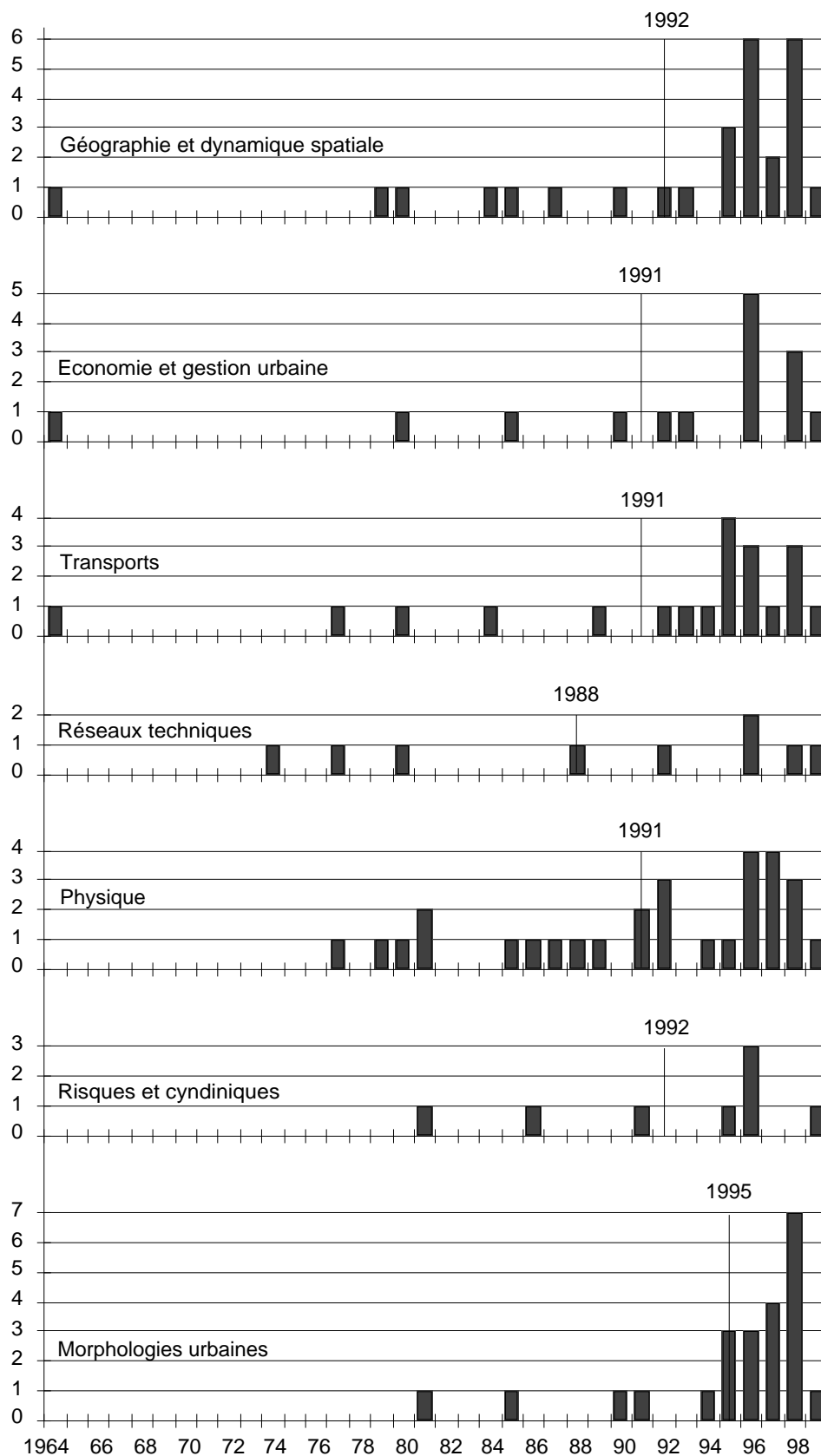
Le même travail d'analyse temporelle peut être effectué pour chacun des huit domaines Inventur. Les résultats sont présentés dans les graphiques page suivante. On remarque avant tout que la forte progression observée pour l'ensemble des modèles reste vraie pour tous les domaines, à l'exception notable du domaine des réseaux techniques et de celui des risques. Hormis ces domaines, tous les autres présentent un bon niveau de progression ces dernières années.

Si l'on calcule l'année de création moyenne par domaine, on obtient le tableau suivant :

	Année moyenne
Ensemble	1991
G	1992
E	1991
S	Non significative
T	1991
R	1988
P	1991
C	1992
M	1995

La plupart des domaines s'inscrivent dans la moyenne de l'ensemble (autour de 1991). Cependant, deux phénomènes apparaissent nettement : le recul des modèles des réseaux techniques, qui ne présentent pas de progression importante ces dernières années et dont l'année moyenne de création se situe en 1988 ; l'émergence des modèles relatifs aux morphologies urbaines (couplées avec d'autres thématiques dans la plupart des cas), dont l'année moyenne de création, compte tenu de la progression récente, se situe en 1995.

Nous avons noté plus haut que le domaine des morphologies urbaines est constitué par le regroupement plus ou moins artificiel de thèmes qui constituent autant des techniques ou des outils de modélisation que des problématiques urbaines en elles-mêmes (ainsi les thèmes : Modèle de terrain, Modèles fractals, Télédétection / Radar, Photogrammétrie, Imagerie urbaine). La forte progression du domaine ces dernières années peut alors trouver une explication simple dans le développement récent de ces techniques et des outils numériques capables de les mettre en oeuvre. Si tel est le cas, on est conduit à penser que ces nouvelles techniques ont bien été appropriées par les modélisateurs, ces dernières années, et qu'elles constituent désormais des outils communs de la modélisation du champ urbain.

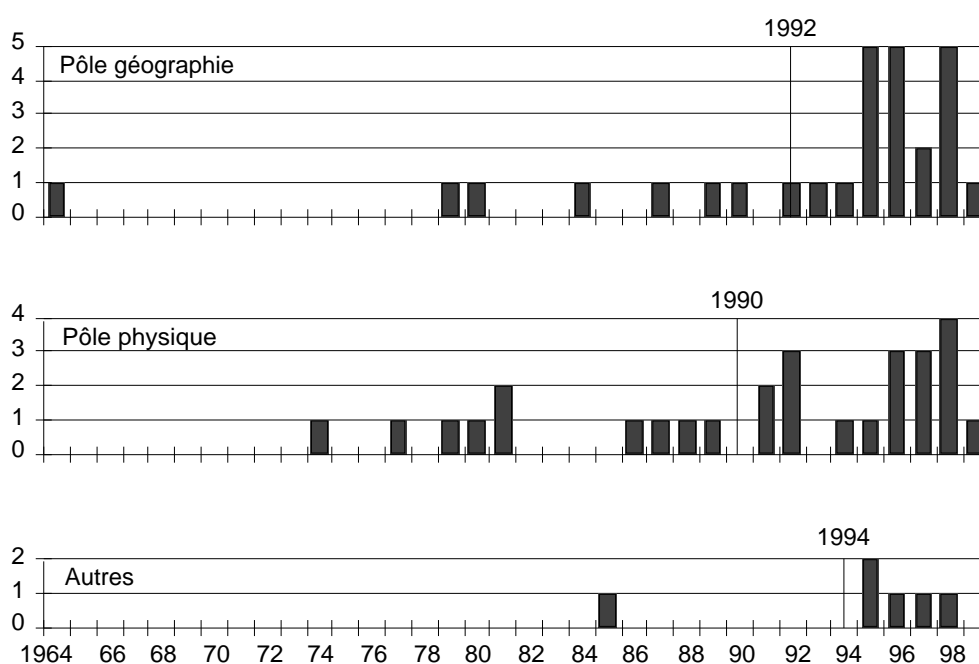


Évolution de la production de modèles par domaines (nombre de modèles inventoriés suivant leur année de création ; traits verticaux : moyennes pondérées des années de création)

• Évolution par pôles

Si l'on effectue les mêmes décompte en prenant cette fois-ci les pôles plutôt que les domaines, on obtient les résultats synthétisés dans les graphiques ci-dessous. On note que les modèles du pôle physique sont en moyenne plus vieux que les autres (année moyenne : 1990). Ceux du pôle géographie sont légèrement plus jeunes que la moyenne (1992), tandis que les modèles autres, créés en moyenne en 1994, semblent très jeunes (ils appartiennent principalement au domaine des morphologies, cf. plus haut).

On remarque également que les deux pôles bénéficient de la croissance de ces dernières années. Cependant, l'effort de développement des modèles semble être plus ancien dans le pôle physique (à partir de 1991) et plus récent dans le pôle géographie (à partir de 1995). L'étalement dans le temps est donc plus grand pour le pôle physique et plus concentré, depuis 4 ans, pour le pôle géographie.



Évolution de la production de modèles par pôles

2.2.3 Conclusion

La production de modèles dans le champ urbain est un fait ancien dont on peut dater les prémises à la fin des années 70. Ainsi, depuis 20 ans au moins, plusieurs modèles sont produits chaque année dans les différents domaines de recherche relatifs à la ville. Ce phénomène semble s'accélérer depuis le début des années 90 où l'on observe une envolée subite du nombre de modèles par année. Ainsi, bien que les modèles dans leur ensemble accuse un âge moyen respectable (année moyenne de création en 1991), plus de la moitié des modèles inventoriés ont été créés ces quatre dernières (de 1995 à 1999). Ce phénomène ne paraît pas résulter de la méthodologie d'inventaire, dont on pourrait penser qu'elle favorise les productions récentes qui ne passeront peut-être pas l'épreuve du temps en comparaison de modèles plus anciens. Au contraire, on remarque qu'une part importante des modèles récemment produits (plus du tiers) sont en partie ou complètement repris de modèles anciens, ce qui peut certainement gager de leur pérennité.

Ces constats dénotent un fort engouement actuel pour les activités de modélisation du champ urbain, que l'on peut lier par ailleurs à une certaine démocratisation des outils de calcul numérique et de développement, tant dans le rapport coût / puissance qu'en facilité d'usage, depuis le milieu des années 90 (apparition d'ordinateurs personnels puissants et d'interfaces ergonomiques).

La progression observée reste vraie pour les 8 domaines prédéfinis, à l'exception notable du domaine des réseaux techniques (année moyenne de création en 1988) et de celui des risques. Parallèlement, cette progression paraît plus forte encore dans le domaine des morphologies urbaines (année moyenne de création en 1995), ce qui peut s'expliquer en partie par le développement récent des techniques plus ou moins inhérentes aux thèmes prédéfinis, en matière d'imagerie urbaine notamment.

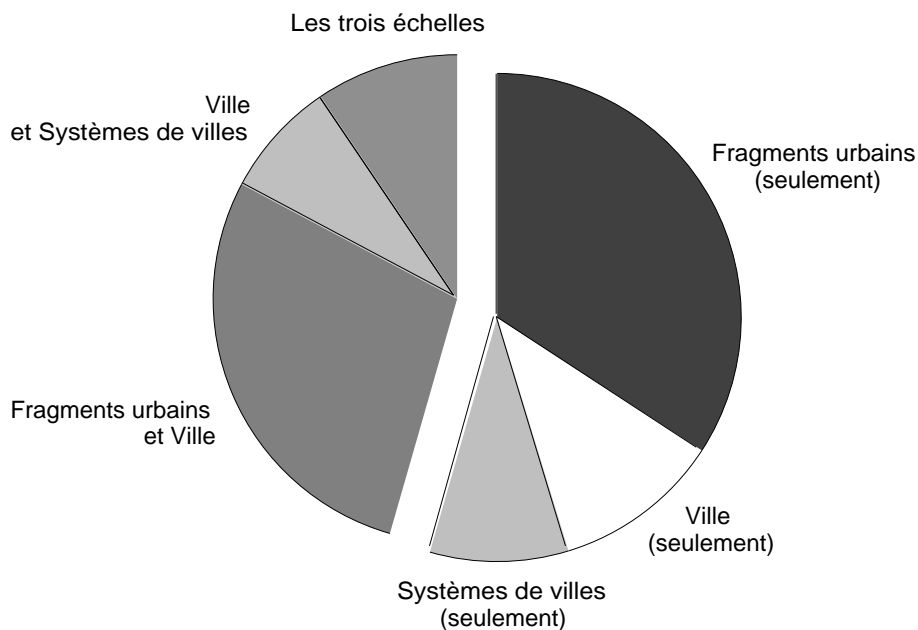
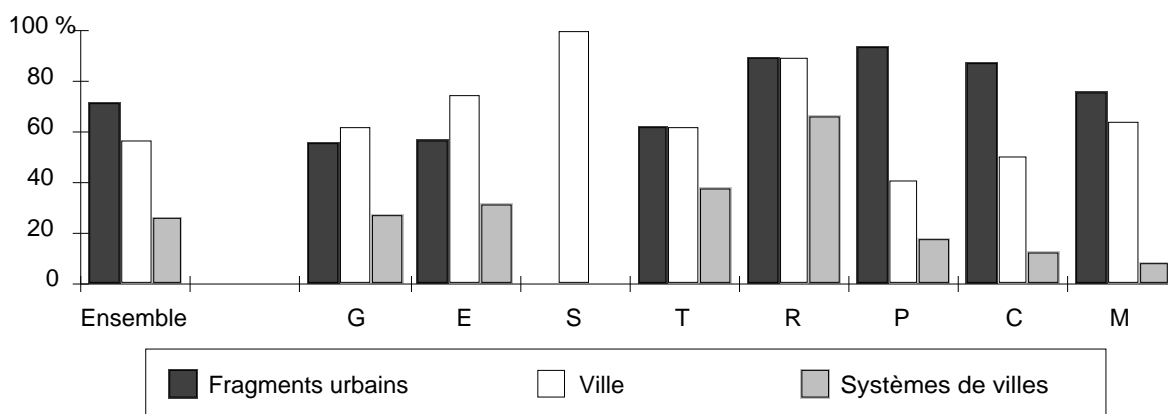
Le pôle géographie et le pôle physique, autour desquels s'articulent l'ensemble des modèles, bénéficient tous deux de la forte croissance de ces dernières années. Cependant, l'effort de développement semble plus ancien dans le pôle physique (à partir de 1991), si bien que les modèles y sont en moyenne légèrement plus vieux. Inversement, le pôle géographie présente des modèles plus jeunes, qui semblent être le fruit d'un engouement plus récent pour la modélisation dans les domaines concernés (à partir de 1995). Sans doute doit-on considérer à ce sujet que les outils de calcul numérique sont d'un usage plus ancien dans les domaines du pôle physique, tandis qu'ils n'ont été appropriés que récemment, au travers de la diffusion des ordinateurs personnels notamment, dans les domaines du pôle géographie. Cette hypothèse est confirmée lorsque l'on examine les outils matériels supports de la modélisation dans les différents domaines (cf. § 4.2.1).

2.3 Échelles et dimensions

2.3.1 Échelles

A quelles échelles les modélisateurs appréhendent-ils le champ urbain ? Le champ 37 du questionnaire Inventur, de type choix multiple, propose trois options pour décrire ces échelles : le niveau des fragments urbains, l'échelle de la ville (considérée comme une entité globale) et celle des systèmes de villes dans un territoire.

La synthèse des résultats est consignée dans les graphiques ci-dessous. On note que dans l'ensemble, les modèles appréhendent le champ urbain avant tout (à plus de 70 % d'entre eux) à l'échelle des fragments urbains, puis à l'échelle de la ville elle-même (près de 60 % des modèles) et enfin à l'échelle des systèmes de villes (moins de 30 % des modèles).



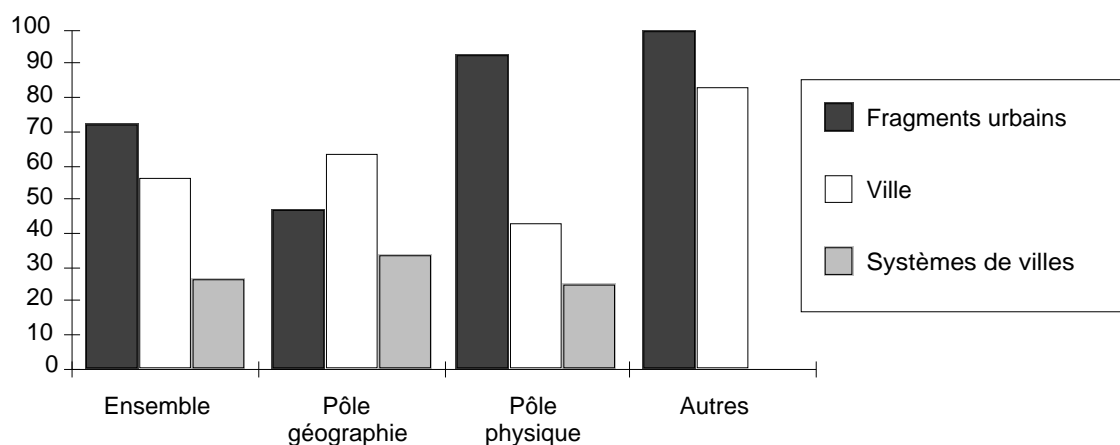
Échelles d'appréhension du champ urbain suivant les domaines

La répartition générale montre que plus de la moitié des modèles (35 sur 64) appréhendent une seule échelle à la fois et, parmi ceux-ci, la grande majorité s'intéresse aux fragments urbains (22 sur 35). Les échelles couplées des fragments urbains et de la ville entière sont appréhendées par plus du quart des modèles (18 sur 64), tandis qu'une petite minorité de modèles aborde les trois échelles en même temps (6 sur 64, ID 17, 18, 42, 51, 52, 56). On note que ceux-ci ont tous trait aux réseaux techniques (d'eau ou de télécommunications) dont la formalisation par graphes permet généralement de représenter toutes les échelles urbaines. Naturellement, aucun modèle ne s'inscrit à la fois dans les échelles des fragments urbains et des systèmes de villes.

Dans le détail, on remarque que l'échelle de la ville est privilégiée dans les modèles en géographie et en économie. Dans ces mêmes domaines, la modélisation des systèmes de villes est également bien représentée. A l'inverse, les domaines de la physique urbaine, des risques et des morphologies urbaines privilégient très largement les échelles des fragments urbains et ne considèrent que très peu les systèmes de villes. Entre ces deux tendances, les domaines des transports et des réseaux techniques se distinguent en ce qu'ils se partagent très équitablement entre fragments urbains, villes et systèmes de villes. Ces divers résultats sont conformes à l'intuition.

• Analyse par pôles

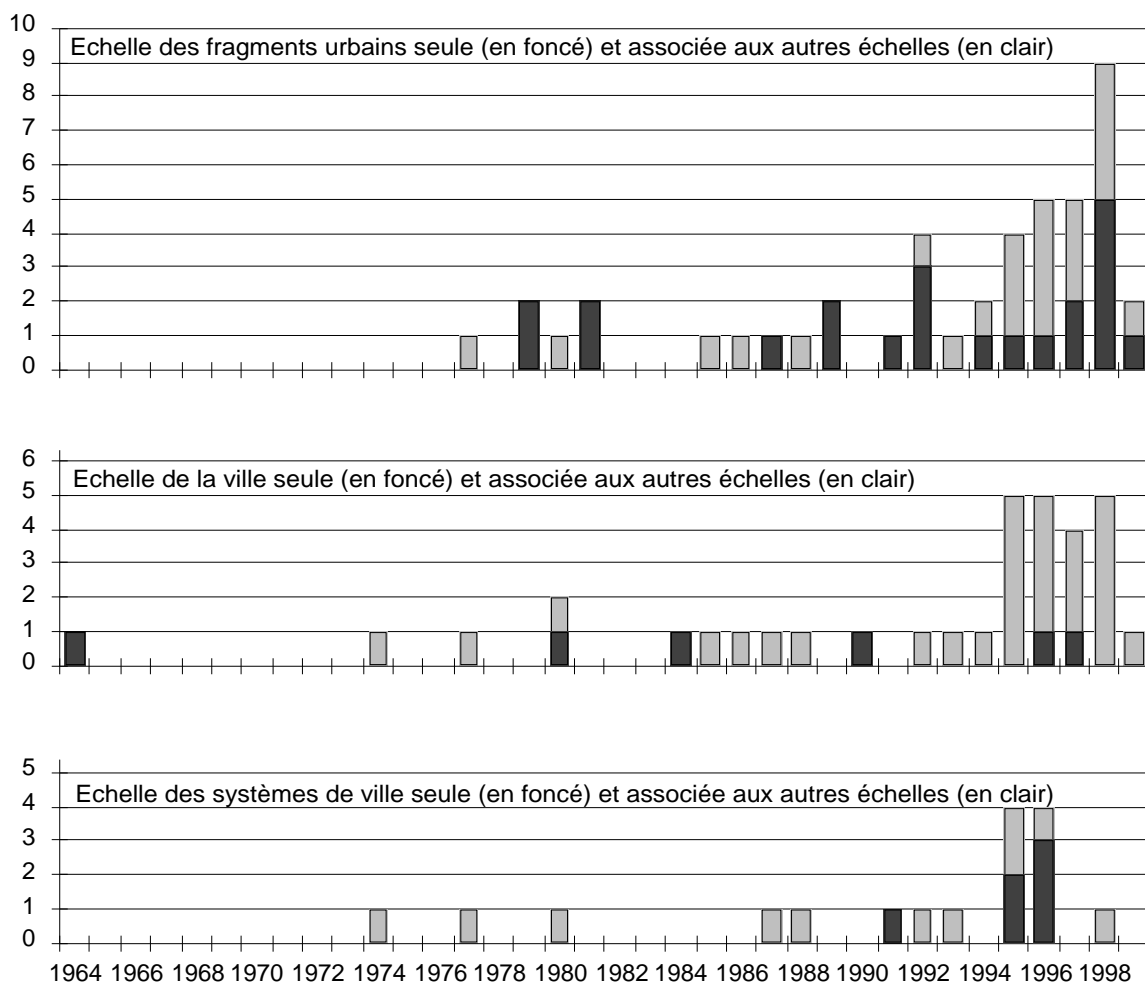
L'analyse par pôles donne les résultats synthétisés dans la figure ci-dessous. Pour confirmer les conclusions précédentes, on note que les modèles du pôle physique abordent quasiment tous l'échelle des fragments urbains. Un peu plus de 40 % d'entre eux appréhendent également l'échelle de la ville tandis qu'une minorité intéresse en plus l'échelle des systèmes de villes. Dans le pôle géographie, les trois échelles sont bien représentées, avec cependant une préférence accusée pour l'échelle de la ville. Les autres modèles intéressent tous ou presque les deux niveaux d'échelle des fragments urbains et de la ville.



Répartition des échelles par pôles

• Échelles et âge des modèles

Existe-t-il une relation entre les échelles traitées et l'âge des modèles ? Autrement dit, y a-t-il des échelles du champ urbain privilégiées à certaines périodes ? Les graphiques page suivante proposent quelques éléments de réponse. Chacun d'eux représente, par année de création, l'ensemble des modèles applicables à chacune des trois échelles. Pour chaque échelle, nous avons différencié les modèles qui ne s'appliquent qu'à cette échelle (hachurés foncé) de ceux qui s'appliquent à cette échelle entre autres (hachurés clair). Hormis les modèles foncés, tous les modèles sont donc représentés dans deux des graphiques au moins.



Évolution de la production de modèles suivant les échelles prises en compte (choix unique parmi les 3 en foncé et choix multiple en clair)

Les graphiques confirment d'emblée la prépondérance de l'échelle des fragments urbains et, à l'intérieur de celle-ci, la proportion importante de modèles ne travaillant qu'à cette échelle. On note également que la forte croissance de la production de modèles ces dernières années profite surtout à cette échelle (notamment en 1998).

Parallèlement, la production de modèles appréhendant l'échelle de la ville enregistre une évolution importante depuis 1995. Cependant, parmi ces modèles, rares sont ceux (en foncé) qui appréhendent exclusivement cette échelle. En réalité, l'évolution constatée dans ce graphique met en évidence la catégorie des modèles s'intéressant simultanément aux deux échelles des fragments urbains et de la ville.

Enfin, on remarque que l'intérêt pour l'échelle des systèmes de villes a connu une évolution soudaine en 1995 et 1996, sans que cette progression se confirme par la suite. L'évolution constatée ces deux années concerne principalement des modèles intéressant exclusivement cette échelle (en foncé). On ignore les raisons de cet engouement soudain et passager.

Les années moyennes de création (tableau ci-dessous) confirment les analyses précédentes. Les modèles appliqués à l'échelle des fragments urbains, soit de manière exclusive, soit avec d'autres échelles, sont conformes à l'âge moyen des modèles. Par contre, l'échelle de la ville seule (modèles n'appréhendant que cette échelle) semble en net recul, avec une année moyenne de création en 1985. L'engouement constaté en 1995 et 1996 pour l'échelle des

systèmes de villes conduit à une année moyenne en 1994 qui semble peu significative compte tenu de nos commentaires précédents.

	Année moyenne de création	
	Modèles en foncé	Modèles en clair
Fragments urbains	1991	1992
Ville	1985	1991
Systèmes de villes	1994	1990

Au total, il semble bien que la modélisation du champ urbain intéresse principalement, depuis quelques années, les échelles des fragments urbains, associées ou non à celle de la ville. Les phénomènes modélisés apparaissent donc plutôt locaux, pris isolément ou en regard de leurs implications sur l'ensemble du territoire urbain. Peu de modélisateurs semblent s'intéresser aujourd'hui à la ville comme un système global isolé ou aux systèmes de villes dans un territoire.

• Précisions sur les échelles

Pour affiner les constats précédents, on peut tenter d'appréhender de manière plus qualitative les échelles prises en compte dans les modèles. Le champ n° 38 du questionnaire Inventur, de type texte, permet d'apporter les précisions utiles à ce sujet. Il est renseigné par les 3/4 des modèles.

Le décompte des occurrences de mots (ci-dessous) ne donne pas de renseignement instructif.

20 échelle(s)
 10 réseau
 9 zone(s), agglomération
 8 système(s)
 7 quartier(s)
 6 espace(s), france
 5 applique(s), exemple, partie(s), bâtiment(s)
 4 transport, résultats, modéliser, quelque(s), région, régionale, grande(s)
 3 fragments, ensemble, niveau, lyon, réseaux, application(s), paris, simulation(s), taille

Par contre, à travers l'analyse du contenu des réponses, on peut noter comment sont définies les échelles d'application du modèle, en fonction des objets ou phénomènes modélisés, ou encore en fonction de la nature du modèle lui-même. Trois principales catégories se dessinent : a) les modèles dont l'échelle d'application est définie par des **entités spatiales artificielles** qui peuvent être de différentes natures ; b) les modèles dont l'échelle est définie par des **entités urbaines physiques ou fonctionnelles** délimitées spatialement à différents niveaux ; c) les modèles dont l'échelle d'application est définie par des **contraintes propres à la formalisation** adoptée, à l'éventuel maillage nécessaire au fonctionnement du modèle (limitation spatiale ou en nombre de noeuds par exemple) ou d'une méthode particulière spécifique au modèle. L'encadré ci-dessous illustre ces différentes situations (extraits littéraux de la base Inventur).

a) Les modèles dont l'échelle d'application est définie par des entités spatiales artificielles qui peuvent être de différentes natures :

a-1) Des entités spatiales administratives :

- On considère une partition de l'agglomération. Dans les applications, pour des raisons d'informations statistiques, c'est le découpage communal qui a été adopté.
- Région d'Ile-de-France
- Le modèle s'applique à une agglomération. Il s'applique également à une zone d'emploi ou à l'arrondissement d'une ville.

a-2) Des zones arbitraires supposées homogènes (suivant différents critères d'homogénéité) :

- 3 zones concentriques: centre, banlieue et périphérie

- Il ne s'agit pas à proprement parler de systèmes de villes, mais plutôt de la zone d'influence de l'agglomération lyonnaise, qui s'étend en partie sur la région Rhône-Alpes et en partie au dehors.
- La région d'Ile de France est découpée en 984 zones qui correspondent à une échelle infraquartiers dans Paris, infracommunale dans la Petite Couronne et les villes importantes de Grande Couronne. Ailleurs, les zones regroupent plusieurs communes.
- Ville élargie : 45 km autour de Lyon.
- Niveau macro-économique : le périmètre de desserte du réseau de transport collectif.
- Zonage grossier (25 zones pour l'agglomération de Lyon, 1.200.000 hab.)
- Le champ d'application du modèle est l'agglomération. Les résultats peuvent être obtenus sur des zones définies à l'avance de cette agglomération. L'interprétation des résultats sera d'autant plus aisée que les zones seront homogènes (en termes fonctionnel ou morphologique)
- 200 km x 200 km autour de la ville de Lyon (inclut aussi Grenoble, Genève, etc.). Jusqu'à 2 km en altitude.

b) Les modèles dont l'échelle d'application est définie par des entités urbaines physiques ou fonctionnelles délimitées spatialement à différentes échelles :

b-1) A l'échelle de l'individu :

- Quartier d'environ 300 mètres de diamètre ou 1000 places de stationnement.
- Quelques milliers de mobiles pour un espace de 500m X 500m
- Taille humaine individuelle et pluri-individuelle : quelques individus dans un couloir à une foule dans un espace public.

b-2) A l'échelle du bâtiment et du groupe de bâtiments :

- Fondations d'un bâtiment, tracé de souterrain
- Batiment / groupe de batiments
- Bâtiments et monuments historiques, parties de ville.

b-3) A l'échelle du quartier, incluant le vide urbain :

- Le modèle s'applique à l'échelle des ilots urbains : création, restructuration.
- De l'espace urbain au quartier
- Echelle du quartier et de l'espace public.
- Un ensemble de quartiers, un territoire géographique étendu (la ville et ses environs)
- Ensemble de bâtiments, voire un quartier
- Une à quelques rues.
- Echelle d'une rue ou d'un quartier.
- From street canyon to urban quarter depending on avail. computer resources
- En ce qui concerne nos travaux, l'échelle d'investigation se limite à l'analyse de la rue avec une précision allant jusqu'au détail architectural.

b-4) A l'échelle de la ville comme entité globale et du système de villes :

- Réseau des 10 principales villes d'Alsace-Lorraine
- On a traité, en commande optimale, des réseaux en Ile de France (périphérie de Paris) couvrant plusieurs communes et desservant un million de consommateurs. Pour l'estimation d'état et la détection de fuites, le programme concernait une partie du réseau rive gauche de Paris.
- Le système de villes peut, dans la version actuelle, comprendre quelque 400 unités (on souhaiterait pouvoir l'étendre). C'est donc un système régional (mais on pourrait facilement adapter le modèle pour simuler les interactions entre le sous-ensemble des plus grandes villes mondiales par exemple).

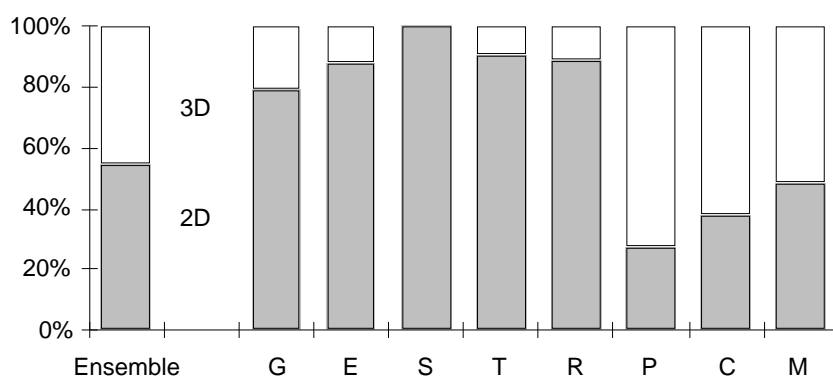
c) Les modèles dont l'échelle d'application est définie par des contraintes propres à la formalisation adoptée, à l'éventuel maillage nécessaire au fonctionnement du modèle (limitation spatiale ou en nombre de noeuds par exemple) ou d'une méthode particulière spécifique au modèle :

- Quartier (1km x 1km)
- Le nombre maximum de noeuds est 100. Ce nombre permet de modéliser, tout un réseau Intercommunal, le réseau d'une ville ou une partie de celui-ci. La finesse de description dépend de la taille du bassin versant à modéliser. Cependant il est possible de créer plusieurs bassins versants (de 100 noeuds maximum) et d'injecter les résultats de simulation du premier BV comme données du deuxième BV etc...
- Le modèle peut être appliqué à des tissus urbains dont la taille varie entre 50 m et plusieurs dizaines de kilomètres (après découpage en cellules élémentaires).
- L'unité élémentaire de l'analyse est fonction du maillage initié lors du carroyage de l'espace.
- Du moment que le réseau de transport reste connexe ou connecté, on peut modéliser un système de ville.
- Par la méthode du zoom nodal, il est possible d'intégrer des éléments d'une échelle géographique plus fine que l'échelle principale d'étude, dans le but de mieux décrire les chaînes multimodales de déplacement des voyageurs. Le champ d'application du modèle (Map et Nod) peut donc concerner aussi bien les systèmes de villes (par exemple le réseau de transport européen à grande vitesse) que les fragments urbains (par exemple les déplacements dans une gare multimodale).
- La mise en oeuvre de simulations est avant tout dépendante des graphes disponibles.

2.3.2 Dimensions spatiales et temporelles

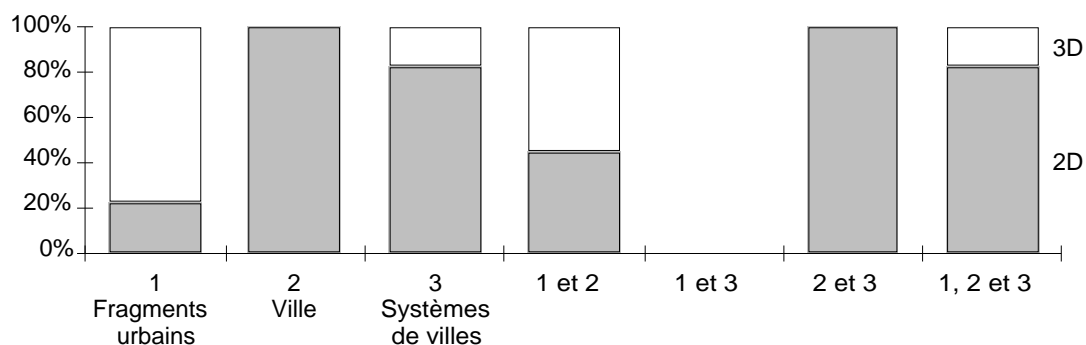
• Dimensions spatiales

Au delà du seul niveau d'échelle, le champ 39 du questionnaire Inventur permet de préciser les dimensions spatiales prises en compte par le modèle et propose pour ce faire les deux options 2D et 3D. Dans l'ensemble, les modèles sont assez bien partagés entre 2D (près de 55 %) et 3D (graphique ci-dessous). Dans le détail, on observe une nette opposition entre les domaines de la géographie, de l'économie, des transports et des réseaux techniques (modèles 2D à 80 % et plus) et ceux de la physique et des risques (modèles 3D à au moins 60 %). Le domaine des morphologies urbaines est partagé entre ces deux options, ce qui confirme nos précédentes conclusions.



Dimensions de l'espace prises en compte par le modèle

Par ailleurs, on note une forte corrélation entre les dimensions spatiales et les échelles d'appréhension du champ urbain prises en compte par les modèles (graphique ci-dessous). Ainsi, les modèles intéressant l'échelle de la ville ou des réseaux de villes apparaissent très majoritairement 2D (seul un modèle à l'échelle des réseaux de villes, traitant de pollution atmosphérique, propose une vision en trois dimensions). A l'inverse, les modèles intéressant les fragments urbains sont très majoritairement 2D. Naturellement, ceux qui abordent ces deux niveaux d'échelle en même temps sont bien partagés entre 2D et 3D.

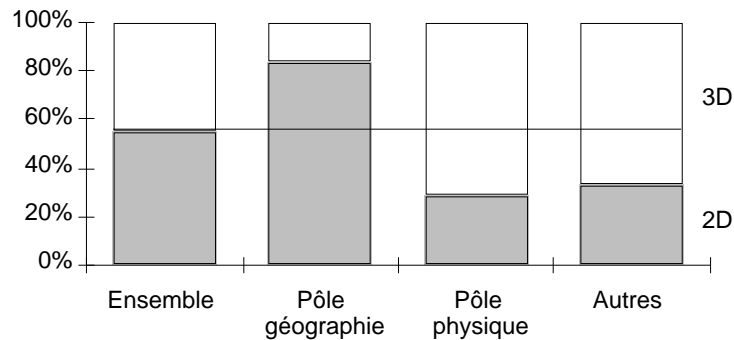


Relations entre les échelles et les dimensions spatiales du modèle

En clair, plus on est au niveau local, plus on traite les trois dimensions. Plus on se place au niveau global, plus on considère le champ urbain en deux dimensions, comme une carte. Seuls quelques modèles abordent les trois niveaux d'échelles en même temps ; l'un d'eux, traitant de problèmes hydrologiques, appréhende le champ urbain en trois dimensions, apparemment à toutes les échelles.

• Dimensions spatiales par pôles

L'analyse par pôles confirme les résultats précédents (graphique ci-dessous). Les modèles du pôle géographie considèrent la ville, dans leur grande majorité, en deux dimensions, tandis que ceux du pôle physique, plus proches de l'échelle des fragments urbains, appréhendent les trois dimensions de l'espace.

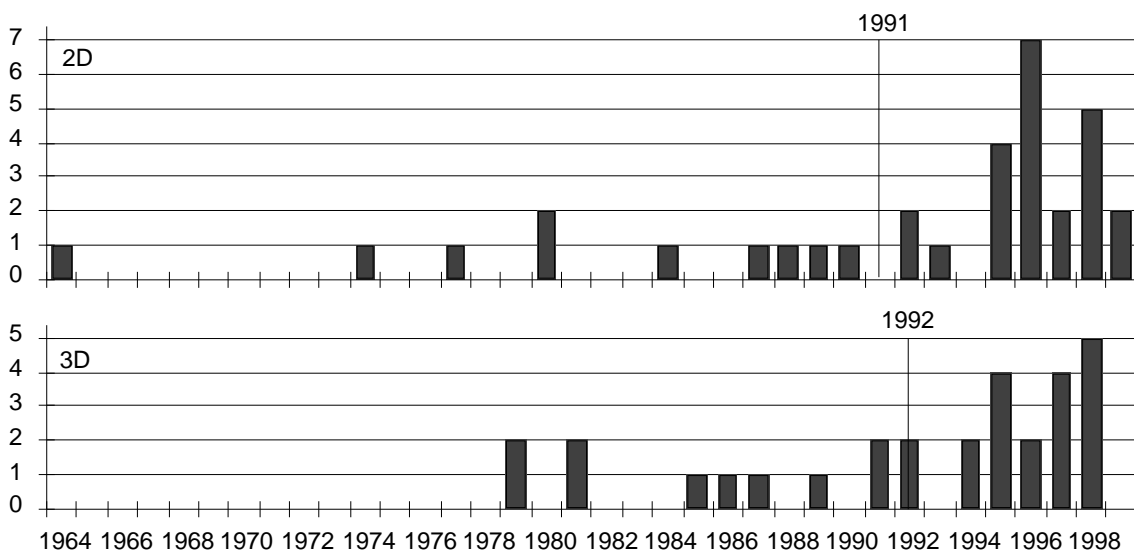


Dimensions suivant les pôles

• Dimensions spatiales et âge des modèles

Peut-on corréler les dimensions spatiales prises en compte et l'âge des modèles ? Autrement dit, est-on en droit de penser que (le progrès aidant ?) plus un modèle est jeune, mieux les dimensions de l'espace sont prises en compte ? Au contraire, doit-on penser que l'analyse du champ urbain en 3D et celle en 2D, plus cartographique, forment des « paradigmes » bien distincts correspondant à des phénomènes de natures différentes et qui se recoupent peu ?

Les graphiques ci-dessous montrent l'évolution temporelle des modèles en fonction des dimensions de l'espace prises en compte. Le partage entre 2D et 3D semble indépendant de l'âge des modèles ; les deux groupes s'étalent sur l'ensemble de la période significative et ils connaissent une même évolution importante ces dernières années. La date moyenne de création pour les modèles 2D se situe en 1991 ; celle pour les modèles 3D en 1992.

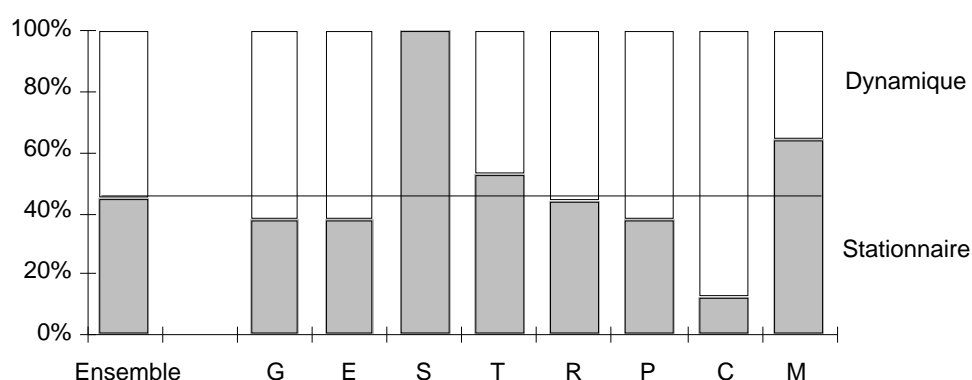


Évolution du nombre de modèles en fonction des dimensions spatiales

Ainsi, il semble qu'il faille penser que, tous domaines confondus, les modèles urbains s'inscrivent d'emblée soit dans une logique cartographique (2D), soit dans une perspective plus proche de la perception (3D). Sans doute les phénomènes modélisés dans chacun de ces groupes sont-ils suffisamment différents pour que peu de recoupements s'opèrent.

• Dimensions temporelles

La question 40 du questionnaire Inventur propose un choix unique entre les options « Dynamique » et « Stationnaire ». La synthèse des résultats par domaines est présentée dans le graphique ci-dessous. On remarque que, dans leur ensemble, les modèles sont partagés entre les deux options, cette situation étant vérifiable pour tous les domaines, sauf celui des risques (modèles dits majoritairement dynamiques) et celui des morphologies urbaines (modèles dits majoritairement stationnaires). Le domaine des transports présente curieusement une petite majorité de modèles dits stationnaires.



État des réponses au champ 40

Ces résultats apparaissent difficiles à analyser. En effet, lorsque l'on compile les réponses au champ 41 de type texte proposant de donner des précisions sur la résolution temporelle du modèle, on obtient l'ensemble de réponses suivant :

- 1/4 heure
- un pas de l'ordre de l'année, une durée de 30 à 100 ans selon les espèces
- cycles de 8 périodes
- dépend de celle de la charge
- 5 ans; horizon 2010 2020
- déterminée par la finesse du maillage ; en pratique, de l'ordre de la s (au minimum)
- Année
- dépend du critère de stabilité (fonction du maillage)
- seconde
- Un événement pluvieux, pas de temps de calcul de 1mn à plusieurs minutes.
- Quelques minutes à plusieurs jours, pas de temps de calcul de 60 s à plusieurs minutes.
- mobilité quotidienne et à l'heure de pointe
- L'année.
- 1050 Hz
- entre 5 KHz et 48 KHz
- centième de seconde
- Pilotage quotidien avec pas de temps de l'ordre de la demi-heure à l'heure.
- Calé sur les recensements généraux de la population.
- Horizon donné (actuellement 2010).
- un pas annuel
- Avant et après aménagement
- libre mais correct de 1/2 à 1 heure
- Heure de pointe et journée
- De 1 seconde à 1 minute.
- Centième de seconde

- Jour, heure de pointe
- 10 sec, typical total simulation time 24- 48 h
- Fonction de la validité des prévisions météorologiques utiles en entrée.
- De 5 Minutes à une heure.
- Pas de temps de l'ordre d'1 à 30 minutes
- A partir de quelques secondes.
- L'année
- Comparaison entre un état actuel et un état futur, selon une projection dans le temps qui peut parfois atteindre la dizaine d'années (dans le cas des lignes de TGV par exemple).
- Résolution temporelle des calculs (chimie et transport) : 1 minute. Résolution temporelle des écritures de résultats : 1 heure.
- Modélisation à un instant t pour le fonctionnement du système de villes. Modélisation sur une période donnée (de l'ordre d'une centaine d'années) pour l'évolution du système de villes et du système de transport : prise en compte de la cinétique du système
- Les simulations sont effectuées sur des périodes de l'ordre de l'année, à des pas de temps de l'ordre de l'heure.
- Le modèle effectue des simulations sur une durée totale de 2000 ans environ, par périodes de 10 ans.

Les réponses manifestent une très grande hétérogénéité et les différentes acceptions des notions de modèle « dynamique » *versus* « stationnaire » sont flagrantes. Pour certains auteurs, la reproduction d'une situation « avant » et d'une situation « après » suffit à considérer que le modèle est dynamique. Pour les autres, les échelles temporelles relatives aux phénomènes étudiés, sont très extensibles ; tous domaines confondus, elles s'étalent du millième de seconde au millénaire !

Il semble qu'on ne puisse rien conclure de précis sur ce point si ce n'est que les acceptions des termes stationnaire et dynamique sont sans doute trop contrastées, dans les différents domaines, pour pouvoir faire des comparaisons. Par ailleurs, l'analyse par année de création (résultats non figurés ici) ne fournit pas non plus de résultat probant, les deux catégories étant bien représentées sur l'ensemble des années (suivant ces résultats, l'évolution récente de la production de modèles semblerait plutôt encourager le développement de modèles dits stationnaires, ce qui n'est peut-être pas sans rapport avec l'émergence du domaine des morphologies urbaines).

2.3.3 Conclusion

Le champ urbain est divisé pour nous en trois échelles qui ne s'excluent pas mutuellement : celle des fragments urbains (majoritairement représentée dans les modèles inventoriés), celle de la ville comme entité globale, et celle du système de villes dans un territoire (représentée de manière minoritaire). Plus de la moitié des modèles appréhendent une seule échelle à la fois et, parmi ceux-ci, la grande majorité s'intéresse aux fragments urbains. Les échelles couplées des fragments urbains et de la ville entière viennent ensuite, tandis qu'une petite minorité de modèles, ayant trait aux réseaux d'eau ou de télécommunications, aborde les trois échelles en même temps.

L'échelle de la ville est privilégiée dans les domaines de la géographie et de l'économie. Dans ces mêmes domaines, la modélisation à l'échelle des systèmes de ville est également bien représentée. A l'inverse, les domaines de la physique, des risques et des morphologies urbaines privilégient largement l'échelle des fragments urbains et ne considèrent que rarement les systèmes de villes. Entre ces deux tendances, les domaines des transports et des réseaux techniques se distinguent en ce qu'ils se partagent équitablement entre fragments urbains, villes et systèmes de villes.

Ces divers résultats sont conformes à l'intuition. Ils sont également vérifiés si l'on effectue l'analyse par pôles : les modèles du pôle physique abordent quasiment tous l'échelle des fragments urbains ; les 2/5èmes d'entre eux appréhendent également l'échelle de la ville, tandis qu'une minorité intéresse en plus l'échelle des systèmes de villes. Dans le pôle

géographie, les trois échelles sont bien représentées, avec cependant une préférence accusée pour l'échelle de la ville.

Cependant, la forte croissance de la production de modèles ces dernières années ne profite pas équitablement aux trois niveaux d'échelles. Au contraire, tous domaines confondus, il semble que le niveau des fragments urbains soit privilégié ces dernières années par les modélisateurs. Ainsi, bien que l'on observe une évolution importante de la production de modèles à l'échelle de la ville depuis 1995 (parallèlement à la forte croissance des modèles du pôle géographie ces dernières années, cf. § 2.2.3), on remarque que parmi ces modèles, rares sont ceux qui appréhendent exclusivement cette échelle et nombreux sont ceux qui lui associe l'échelle des fragments urbains. De même, l'intérêt pour l'échelle des systèmes de villes a connu une évolution soudaine en 1995 et 1996, sans que cette progression se confirme par la suite.

Au total, il semble bien que la modélisation du champ urbain intéresse principalement, depuis quelques années, les échelles des fragments urbains, associées ou non à celle de la ville. Les phénomènes modélisés apparaissent plutôt locaux, pris isolément ou en regard de leurs implications sur l'ensemble du territoire urbain (fragments urbains et ville). Peu de modélisateurs semblent s'intéresser aujourd'hui à la ville comme une entité globale isolée ou aux systèmes de villes dans un territoire. Les différents niveaux d'échelles pris en compte sont naturellement définis par les phénomènes en jeu et les entités modélisées (entités spatiales artificielles, entités physiques ou fonctionnelles délimitées spatialement), mais également par des contraintes propres à la formalisation choisie, par l'éventuel maillage nécessaire au fonctionnement du modèle (limitation spatiale ou en nombre de noeuds par exemple), ou encore par une méthode particulière spécifique au modèle.

Par ailleurs, les dimensions de l'espace prises en compte par les modèles sont fortement corrélées aux échelles auxquelles ces modèles appréhendent le champ urbain. Ainsi, les modèles du pôle géographie et ceux du domaine des réseaux techniques, qui appréhendent le champ urbain à l'échelle de la ville ou du système de villes, sont très majoritairement 2D. A l'inverse, les modèles des domaines de la physique et des risques, qui s'inscrivent plus souvent à l'échelle des fragments urbains, sont majoritairement 3D. Le domaine des morphologies urbaines est bien partagé entre les deux options, ce qui confirme nos précédentes conclusions sur la scission de ce domaine dans les deux pôles.

En clair, plus on est au niveau local, plus on traite les trois dimensions. Plus on se place au niveau global, plus on considère le champ urbain en deux dimensions, comme une carte. Ce partage est par ailleurs indépendant de l'âge des modèles : les deux groupes de modèles s'étalent sur l'ensemble de la période significative (depuis 1979) et ils connaissent une même évolution importante ces dernières années.

On est ainsi conduit à penser que l'appréhension de l'espace urbain dans les modèles est avant tout liée à des logiques différentes inhérentes aux phénomènes en jeu. Dans le pôle géographie (mais aussi dans le domaine des réseaux techniques), le champ urbain est une carte et les phénomènes modélisés s'inscrivent dans la logique de ce support. Dans le pôle physique au contraire, la ville est en ensemble de fragments, formant un milieu dans lequel les phénomènes occupent l'espace de manière plus proche de la perception humaine. Il semble que ces logiques forment des « paradigmes » bien distincts qui se recoupent peu.

3.

Motivations des auteurs de modèles du champ urbain

Qui fabrique des modèles, dans quels objectifs
et pour qui ?

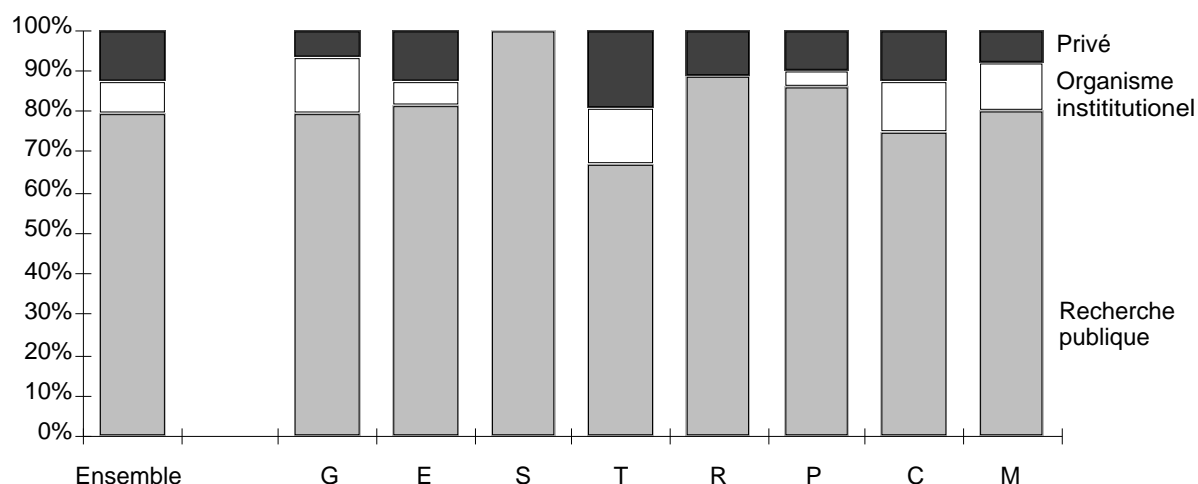
3.1 Origine des modèles

Nous examinons ici rapidement l'origine des modèles à travers les types d'organismes dont émanent leurs auteurs. Nous mentionnons également quelques éléments d'analyse concernant la nationalité des auteurs et des modèles.

3.1.1 Auteurs

Le champ 8 du questionnaire Inventur, de type choix unique, divise les auteurs de modèles en trois catégories : les organismes privés, les organismes institutionnels (recherche hors universités) et les autres structures de recherche publique.

Le graphique ci-dessous synthétise les résultats obtenus. On note que dans l'ensemble, les modèles recensés proviennent très majoritairement de la recherche publique. Ceci reste vrai pour tous les domaines ; le domaine des transports présente cependant une plus forte présence des modèles d'organismes privés et institutionnels (plus de 30 % au total).



Statut des auteurs de modèles suivant les domaines

Dans le détail, les résultats par catégories sont consignés dans le tableau page suivante. On note que certains organismes comme le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Ministère de l'Équipement) s'inscrivent pour des modèles différents tantôt dans le groupe des organismes institutionnels, tantôt dans celui des laboratoires de recherche publique. Il est vrai que la distinction entre ces deux catégories peut ne pas apparaître nettement.

La forte prédominance des laboratoires de recherche publique ne doit pas laisser penser que ceux-ci sont les principaux développeurs de modèles. En réalité, on est conduit à penser que la mise en oeuvre de l'inventaire, dans le cadre des institutions nationales du CNRS, a focalisé l'attention sur les laboratoires publics. Cette hypothèse est confirmée lorsque l'on observe le statut du rédacteur par rapport au modèle, c'est-à-dire le rapport qu'entretient la personne répondant au questionnaire Inventur avec le modèle décrit.

<p>Organismes privés :</p> <ul style="list-style-type: none"> • MODELISTICA • IAURIF • EDF & SIMULOG • ATN SA (Philippe Casanova et Collaborateurs) • HAGUE CONSULTING GROUP (P-B) • FRANCE-TELECOM + CNET • CHAM (UK) • SYSTEMS APPLICATIONS INT. (USA) 	<p>Organismes de recherche publique :</p> <ul style="list-style-type: none"> • IMAG-INRIA Grenoble + M.I.T. USA • INRETS • UNIL et CIRAD-AMIS, MONTPELLIER • IFU (Intitut Français d'Urbanisme) • LEMA - Universite de Liege • CERMA • Ecole d'Architecture de Nantes • LET-ENTPE, Vaulx-en Velin • CSTB Saint Martin d'Hères • EDF • CSTB Saint Martin d'Hères • Anjou Recherche, Saint-maurice cedex • Institut d'Eco-Technologie, Cranfield, U.K. • LCPC, PARIS • GRECO (Ecole d'Architecture de Toulouse) • ACROE -INPG, Grenoble • IRISA, Rennes • CAS, Ecole des Mines de Paris • LET MRASH, Lyon • Laboratoire SURFACES, LIEGE - BELGIQUE • Ecole d'architecture de Lyon • UMR CNRS 6598, Ecole Centrale de Nantes • DAH, IRIN, Université de Nantes • FR CNRS 73, NANTES • Inst. of Geography, U. of Bochum, Germany • LTMU, Champs sur Marne • UMR 6590, Université du Maine, LE MANS • CEMAGREF DE BORDEAUX • Université Bordeaux I, Talence • Institut de physique théorique, U. de Stuttgart • INRETS-TRACES, Villeneuve d'Ascq • Maison de la Géographie de Montpellier • CRAI, Ecole d'Architecture de Nancy • Université de Tours - CESA • LCPC, Centre de Nantes • LAFORIA + INED + Equipe P.A.R.I.S
<p>Organismes institutionnels :</p> <ul style="list-style-type: none"> • LCPC PARIS • HCG -FRANCE pour le compte du STP • ADEUPa de Brest + TNI : Technopôle Brest-Iroise • DREIF (Division des Inf. et des Transports) • IGN (Anne Ruas, Laboratoire COGIT) 	

Organismes cités par types (affectations choisies par les auteurs)

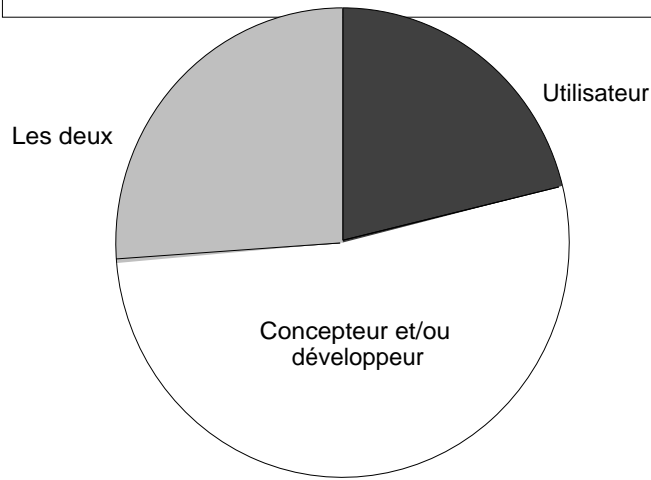
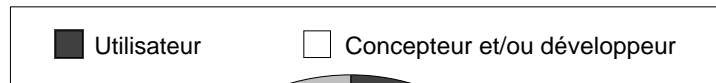
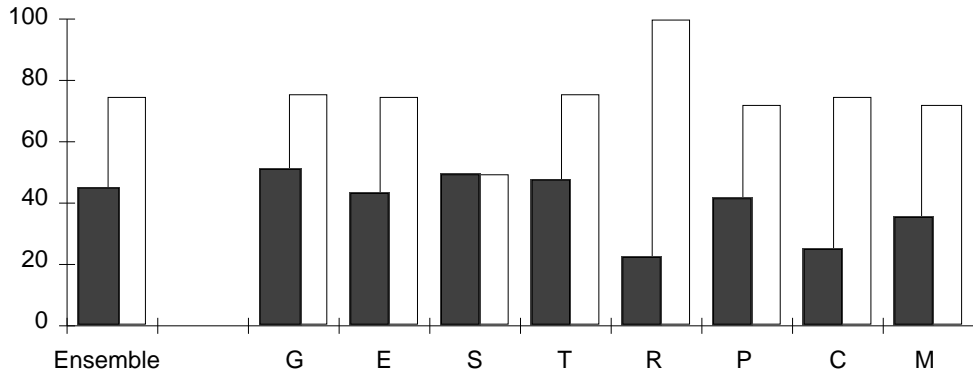
On note à ce sujet (graphique page suivante, en haut) que ce sont principalement les concepteurs et/ou développeurs de modèles qui décrivent ces modèles. Ils sont également parfois eux-mêmes utilisateurs du modèle. Moins du quart des réponses proviennent de « simples » utilisateurs. On confirme donc que l'inventaire a touché en priorité le monde de la recherche publique (3 rédacteurs ne répondent pas, ID 13, 19, 50).

On note par ailleurs que dans tous les domaines, une part importante des concepteurs de modèles sont également utilisateurs, ce qui anticipe sur une autre conclusion à venir à savoir : les modèles sont conçus par des chercheurs pour des chercheurs, à des fins de production de connaissances dans leur communauté scientifique.

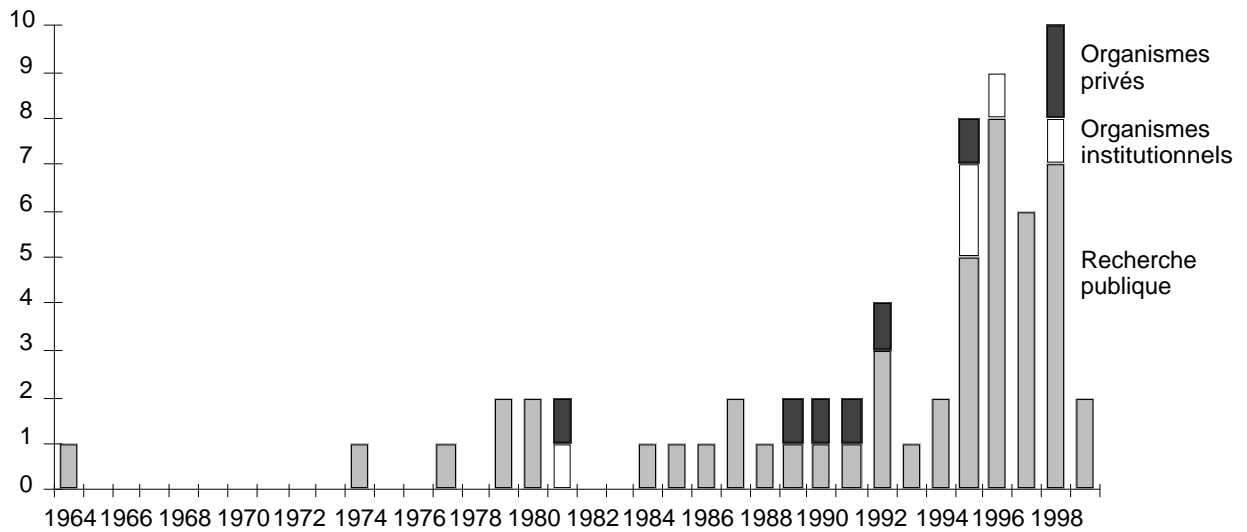
• Origine et âge des modèles

Le graphique page suivante (en bas) montre la part relative des trois catégories d'auteurs pour l'ensemble des modèles distribués selon leur année de création.

On observe que la forte augmentation de la production de modèles ces dernières années est essentiellement le fait des structures de recherche publique, mais aussi des organismes dits institutionnels (depuis 1995). Malgré leur faible nombre, les modèles produits par le secteur privé s'étalent plus régulièrement, de 1981 à 1998.



Statut du rédacteur du questionnaire par rapport au modèle



Évolution chronologique suivant l'origine des modélisateurs

3.1.2 Nationalités

L'inventaire comporte une majorité de modèles issus organismes français. Cependant, en examinant les réponses textuelles au champ 7 concernant l'identité et les coordonnées des auteurs (réponses éventuellement partielles), on remarque qu'au moins 9 modèles ont été développés à l'étranger (tableau ci-dessous), dont 2 sont décrits en anglais (ID 47 et 60).

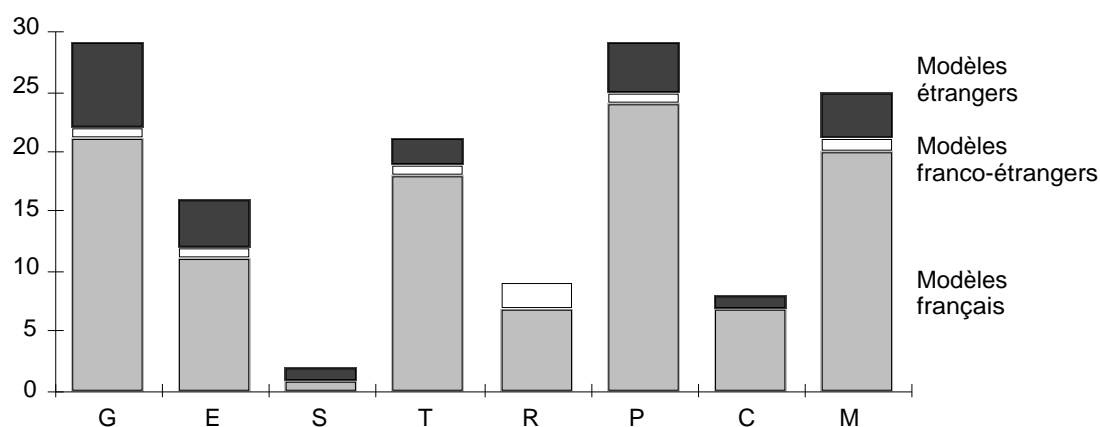
ID	Auteurs	Pays
3	MODELISTICA, Caracas	Venezuela
7	LEMA, Université de Liege	Belgique
22	Peter Allen, Institut d'Eco-Technologie, Cranfield	Royaume Uni
39	Jean-Paul Donnay, Laboratoire SURFACES, Liege	Belgique
47	Michael Bruse, Inst. of Geography, Univ. of Bochum	Allemagne
54	Brian SPALDING, Société CHAM, London	Royaume Uni
55	G. Haag, W. Weidlich, Inst. de physique théorique, Univ. de Stuttgart	Allemagne
60	Lowry	Etats-Unis ?
61	Systems Applications International ICF Kaiser Engineers Inc., San Rafael	Etats-Unis

Par ailleurs, 4 modèles (au moins, compte tenu de l'imprécision relative des réponses au champ examiné) ont été développés par une équipe française en relation avec une équipe étrangère. Ils sont consignés dans le tableau ci-dessous. Au total, 13 modèles sur les 64 recensés, soit 20 % d'entre eux, peuvent donc être considérés comme internationaux.

ID	Partenaires français	Partenaires étrangers
1	Francois Sillion, iMAGIS GRAVIR / IMAG, INRIA Grenoble	Julie Dorsey M.I.T., Etats-Unis
18	Anjou Recherche, 1 place de Turenne, 94417 Saint-maurice cedex /	Wallingford Software Ltd, Wallingford, Angleterre
38	HCG France 30, Paris	Hague Consulting Group, Pays-Bas
42	Marc Lebourges, Maurice Klein, Catherine Gloaguen, Isabelle Le Madec, France Télécom / CNET, François Baccelli, ENS Ulm	Sergei Zuyev, Université de Galsgow, Ecosse (précédemment INRIA Sophia Antipolis)

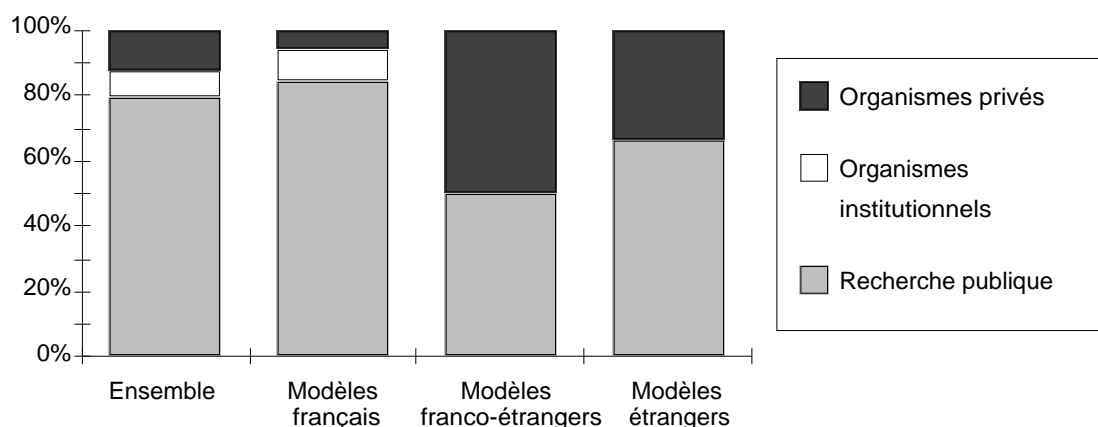
• Nationalités par domaines

Si l'on reporte les données précédentes par domaines, on obtient les résultats du graphique ci-dessous. On note que les modèles internationaux se répartissent dans tous les domaines, et plus particulièrement dans ceux du pôle géographie.



Nationalité des modèles, en nombre de modèles par domaines

On peut faire un décompte analogue en considérant le statut des auteurs (graphique ci-dessous). Il apparaît, conformément à l'intuition, que les modèles internationaux sont plus souvent issus d'organismes privés que ceux de la recherche publique. Naturellement, les modèles d'organismes institutionnels sont tous d'origine française.



Origine des modèles selon la nationalité

3.1.3 Conclusion

La mise en oeuvre de l'inventaire, dans le cadre des institutions nationales du CNRS, a focalisé l'attention sur les laboratoires publics, si bien que la très grande majorité des modèles inventoriés proviennent de ce secteur. Les autres modèles recensés proviennent d'organismes de recherche institutionnelle (hors universités) et du secteur privé. On note que, toutes proportions gardées, le domaine des transports présente une plus forte présence des modèles dits institutionnels ou privés.

Ce sont par ailleurs les organismes français qui ont été principalement touchés. Cependant, 9 modèles de l'inventaire proviennent d'un organisme étranger et 4 modèles au moins ont été développés par une équipe française en relation avec une équipe étrangère. Au total, 20 % des modèles inventoriés peuvent être considérés comme internationaux. Ils sont répartis dans tous les domaines mais ils émanent plus souvent d'organismes privés (ce qui peut expliquer en partie leur diffusion et leur utilisation en France).

Ce sont principalement leurs concepteurs ou leurs développeurs, c'est-à-dire les chercheurs, qui décrivent les modèles. Moins du quart des réponses proviennent de simples utilisateurs. Cependant, une part importante des concepteurs de modèles sont également utilisateurs de ces modèles, ce qui anticipe sur une conclusion à venir : les modèles sont conçus par des chercheurs pour des chercheurs, à des fins de production de connaissances dans leur communauté scientifique.

Enfin, on remarque que la forte croissance de la production de modèles ces dernières années est essentiellement le fait des structures de recherche publique, mais aussi des organismes dits institutionnels (depuis 1995). Malgré leur faible nombre, les modèles produits par le secteur privé s'étalent plus régulièrement de 1981 à 1998.

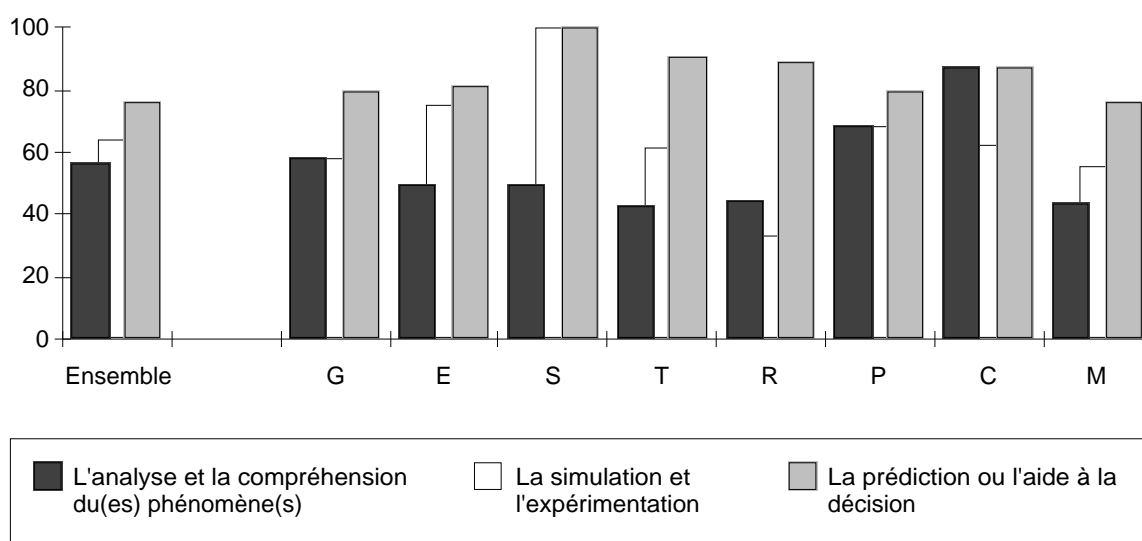
3.2 Objectifs et problématique

3.2.1 Objectifs de la modélisation

• Bilan

La question 31 du questionnaire Inventur, de type choix multiple, permet de définir les objectifs du projet de modélisation suivant 3 catégories : a) l'analyse et la compréhension du ou des phénomènes, b) la simulation et l'expérimentation, c) la prédiction ou l'aide à la décision.

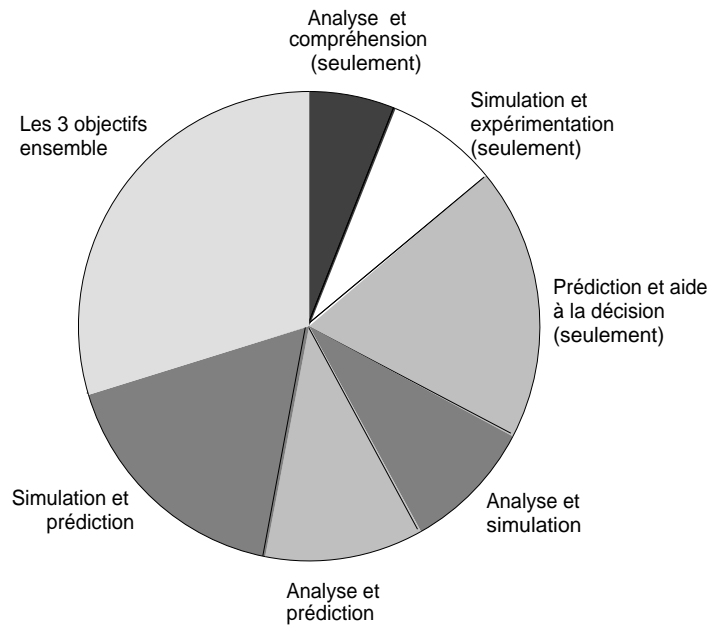
Le graphique ci-dessus synthétise les résultats. On observe que, pour l'ensemble des modèles, la prédiction et l'aide à la décision sont les objectifs privilégiés de la modélisation. Ceci reste vrai pour tous les domaines, ce qui tend à laisser croire que les modélisateurs visent avant tout des objectifs opérationnels ou « de terrain ». On note également que dans les domaines de la physique et des risques, l'objectif d'analyse et de compréhension des phénomènes constitue un ressort important de la modélisation.



État des réponses au champ 31

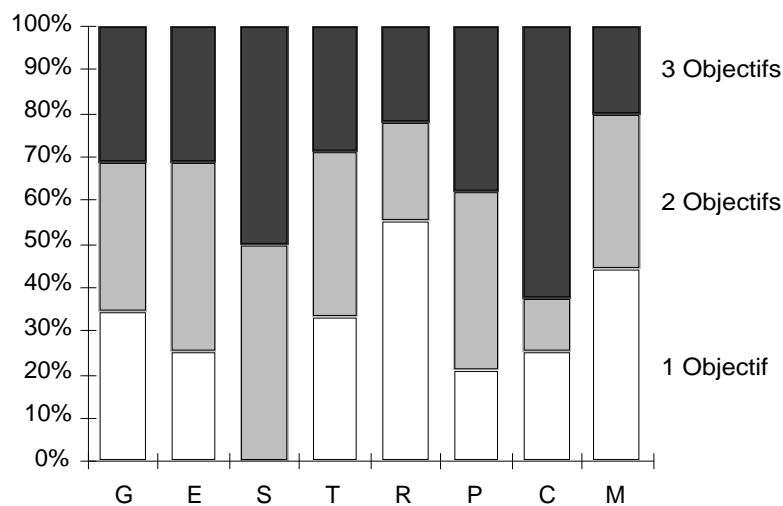
Pour cette question à choix multiple, on peut représenter le détail des différentes options choisies soit seules, soit cumulées (graphique page suivante). Trois catégories de modèles se dessinent qui partagent l'ensemble en trois tiers :

- un tiers environ des modèles ne visent qu'un seul objectif, avec parmi eux une majorité visant seulement la prédiction et l'aide à la décision ;
- un tiers environ des modèles visent deux objectifs simultanément, avec parmi ceux-ci, une forte majorité visant la simulation ou l'analyse en même temps que la prédiction et l'aide à la décision ;
- un tiers des modèles visent les trois objectifs simultanément.



Objectifs du modèle : répartition des choix multiples

Si l'on reporte ces données par domaines (graphique ci-dessous), on note que les modèles du domaine des réseaux techniques sont conçus majoritairement autour d'un unique objectif (la prédiction ou l'aide à la décision). Ceux du domaine des risques visent majoritairement les trois objectifs simultanément. Dans les autres domaines, on observe un certain équilibre entre les modèles, suivant qu'ils visent un seul, deux ou trois des objectifs prédéfinis.

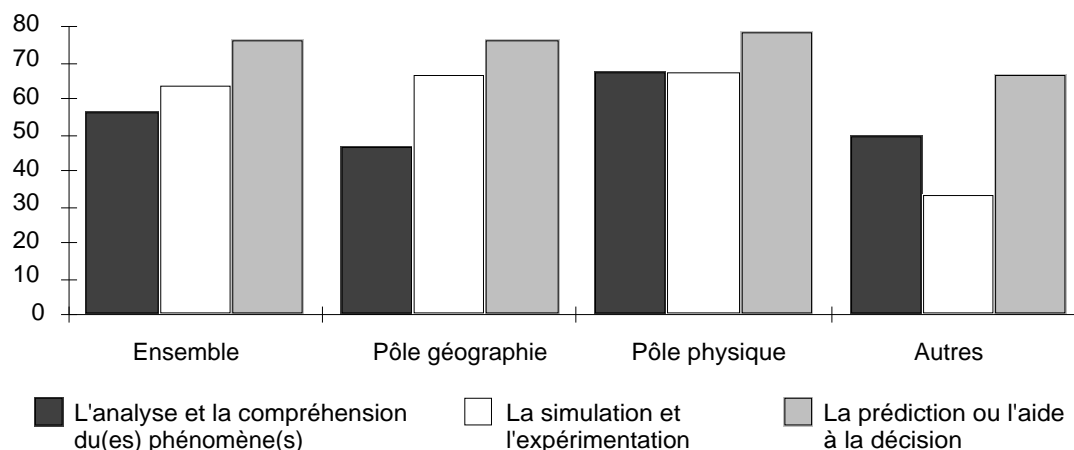


Répartition du nombre d'objectifs suivant les domaines

• Analyse par pôles

Le graphique page suivante montre la répartition des objectifs suivant les pôles définis dans la première partie. Ces résultats confirment que les deux pôles mettent en avant l'objectif de prédiction ou d'aide à la décision (plus de 75 % des modèles de chaque pôle). La simulation et l'expérimentation sont également des objectifs bien distribués, concernant les 2/3 des modèles de chaque pôle.

On note cependant que les pôles se différencient quant à l'importance accordée à l'analyse et à la compréhension des phénomènes (objectif 1) dans le processus de modélisation. Cet objectif est bien représenté dans le pôle physique, moins bien dans le pôle géographique. Ce résultat pourrait traduire une différence de nature de la modélisation. Ainsi, dans le pôle physique, les phénomènes seraient modélisés en partie pour être mieux compris, tandis que dans le pôle géographique, les phénomènes seraient « compris » (ou plus exactement subordonnés à un grille d'analyse et de compréhension) avant d'être modélisés. Cette hypothèse mériterait une discussion plus approfondie.



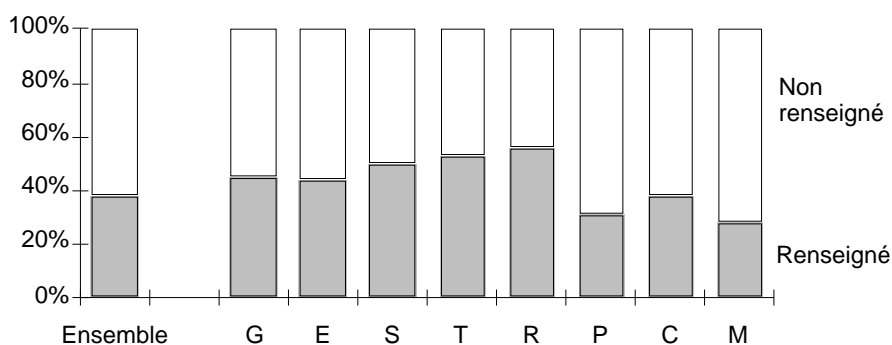
Objectifs de la modélisation par pôles

• Précisions sur les objectifs du projet de modélisation

Le champ 32 du questionnaire, de type texte, permet aux rédacteurs d'apporter si nécessaire quelques précisions sur les objectifs de la modélisation, notamment si les termes proposés ci-dessus ne conviennent pas au modèle décrit.

Ce champ est peu renseigné (graphique ci-dessous). On peut noter qu'il est plutôt mieux renseigné dans les domaines du pôle géographique et des réseaux techniques, et plutôt moins bien dans les domaines de la physique, des risques et des morphologies. Suivant les domaines, les auteurs se reconnaîtraient donc plus ou moins dans les objectifs prédéfinis par les termes de la question précédente.

Le décompte des occurrences de mots ne fournit pas de résultats probants. L'analyse du contenu des réponses permet cependant de mettre en évidence des objectifs de modélisation



État des réponses au champ 32

plus ou moins originaux qui complètent ou précisent les trois grandes classes prédéfinies dans le questionnaire. Nous retenons ainsi les éléments suivants :

- **l'aide à la conception** (ID 16) que l'on peut différencier en partie de l'aide à la décision,
- l'étude de **plusieurs scénarii** possibles (ID 51), ou les **tests stratégiques** (de politique des transports, ID 19), qui précisent en partie la notion de simulation,
- **l'optimisation** ou la recherche des solutions optimales (ID 20, 47, 53)
- l'expérimentation de sous-modèles et à la réalisation de **simulations de référence** (ID 43), qui peut faire partie des objectifs de compréhension des phénomènes,
- la **pédagogie** (dans le cadre d'un enseignement de second cycle en économie spatiale, ID 56).

Il semble que les objectifs des autres modèles puissent être considérés comme des instances des trois classes prédéfinies.

3.2.2 *Problématique qui a conduit au développement du modèle*

En complément de la vision transversale des objectifs de modélisation, le champ 49 du questionnaire permet de préciser la problématique sous-tendant le travail des modélisateurs. Il permet également de justifier la pertinence du modèle dans le cadre du questionnement posé. On note que ce champ est renseigné par tous les modèles sauf l'un d'eux (ID 3). Par ailleurs, les réponses sont très complètes puisque l'on compte une moyenne de près de 55 mots pour chacune d'elle.

Le décompte des occurrences de mots, tous domaines confondus, fournit la liste suivante :

20 transport(s)
 12 outil(s), effets
 11 politique(s)
 10 spatiale(s), compte, processus, terme
 9 reseaux, decision(s), evolution, mesure(s), offre
 8 niveau, projet(s), echelle(s), pollution(s), demande, modelisation, autre(s), systeme(s)
 7 representation(s), economique(s), locale(s), prise(s), simuler, espace, long, reseau, simulation(s), analyse
 6 forme(s), environnement(s), bien(s), croissance(s), phenomene(s), donnees, necessaire
 5 geographique(s), aménagement, concentration(s), changement(s), annees, organisation, mise, sonores, consequences, déplacements, emploi(s), population(s), agglomeration(s), comportement(s), permettant
 4 comprendre, depuis, modeliser, logistique(s), modification(s), besoin(s), cadre, type, urbanisme, agence(s), distribution, developpement, qualite(s), utilise(s), evenement(s), considere(s), collectivite(s), entreprises, aide, ecoulements, fonction(s), differentes, evaluation, connaissance(s), repartition, prealable(s), amelioration, place, grande(s), possible(s), mode(s), atmospheriques, premiere, elements, preoccupation(s), etude(s), implique(s), cout(s), fonctionnement, disposer, temps
 3 photo(s), moyens, milieu, changes, canopee, dynamique(s), choix, pression, relations, physiques, parametres, hypothese(s), contexte(s), elaboration, sein, souvent, difficile, humain(s), partir, exemple, rend, trouver, quartier(s), methode(s), resultats, image(s), part, situation(s), problematique(s), activites, collectifs, a, base, logiciel(s), conduit, pouvoir, souhaite, dispersion, prevoir, actuelle, question(s), service(s), comment, ferroviaire(s), automobile(s), peripherie, etalement, soumise(s), calcul, voir, developper, partie(s), investissement(s), trafic, prevision(s), france, permet, pratiques, tout, stationnement, different(s), theorique(s), morphologique(s), visualisation, algorithme(s)

On retrouve à nouveau la prépondérance de la notion de transport. Les mots cités ensuite pourrait être interpréter comme suit : « construire un outil capable de simuler les effets

d'une politique de l'espace selon différents processus ... ». Au delà du jeu verbal, l'analyse du contenu des réponses permet de distinguer cinq grandes catégories de problématiques de modélisation :

1. **Comprendre** un phénomène observé en milieu urbain, décrire / caractériser / étudier / analyser / mieux connaître un phénomène, réaliser des expériences numériques.
2. **Innover** dans un domaine de connaissance, avancer dans la modélisation, proposer de nouveaux outils de modélisation.
3. **Satisfaire une nécessité**, un besoin opérationnel ou stratégique / politique.
4. **Prévoir** / anticiper, montrer les conséquences / les effets d'un événement ou d'une politique, tester des hypothèses, définir une politique dans un domaine, assister / aider les processus décisionnels.
5. **Calculer** / simuler en général, assister la conception de projets en particulier.

L'encadré ci-dessous illustre ces catégories (extraits littéraires). On note qu'il s'agit de classes schématiques : un même modèle peut partager plusieurs objectifs et s'inscrire de ce fait dans plusieurs catégories.

- a) **Comprendre un phénomène observé en milieu urbain, décrire / caractériser / étudier / analyser / mieux connaître un phénomène, réaliser des expériences numériques**
- comprendre les relations entre les émissions dues à l'homme (notamment aux voitures) et la pollution de l'air, en milieu urbain.
 - comprendre les processus chimiques et photochimiques conduisant aux pics de pollution à l'ozone en période estivale chaude.
 - comprendre et simuler la redistribution de la population au sein du système des villes, c'est-à-dire de comprendre et de simuler les déclins ou croissances relatives de certaines villes ou certaines catégories de villes au sein du système (...)
 - meilleure compréhension des phénomènes de croissance des plantes agronomiques pérennes
 - Décrire les formes non régulières. Caractériser les formes d'une manière automatique et indépendante de la subjectivité du morpho-analyste. Rendre objective la comparaison des formes spatiales entre elles
 - Etude de la répartition des populations et des activités à l'intérieur de la ville : processus de redistribution, de croissance, de concentration, de dispersion, de concurrence.
 - Analyse des facteurs physiques d'ambiance; les relations entre soleil et lumière
 - mieux connaître le phénomène d'étalement urbain qui dépasse la simple périphérie des villes
 - Le modèle est destiné à suppléer le manque d'expériences exploratoires de la dynamique et de la thermodynamique de la canopée urbaine, donc à réaliser des expériences numériques.
- b) **Innover dans un domaine de connaissance, avancer dans la modélisation, proposer de nouveaux outils de modélisation**
- proposer de nouveaux algorithmes de visualisation, permettant de manipuler en temps réel (ou du moins de façon très rapide/interactive) des modèles urbains
 - WSL possédait un modèle hydraulique puissant auquel elle souhaitait ajouter la pollution. AR possédait un modèle dont l'hydraulique devait être complétée, mais avec un module pollution reconnu. A l'issue d'une comparaison des deux modèles sur une étude de modélisation réelle, les modules les plus performants des deux modèles ont servi de base à l'établissement de HYDROWORKS DM
 - Trouver un modèle qui rend compte quantitativement mais aussi qualitativement de phénomènes collectifs observables
 - modéliser et optimiser la qualité de l'eau fournie par un réseau d'eau potable (...) trouver un modèle différent qui permette à la fois de calculer l'évolution des concentrations en désinfectant et de simplifier la mise en place d'un modèle d'optimisation.
 - proposer un outil de mesure de l'ajustement local entre offre et demande alimentaire - ce type d'outil étant, à notre connaissance, inexistant aujourd'hui
 - Généralisation automatique de données géographiques : créer une carte à partir d'une base de données, créer une base de données dérivée (...) L'enjeu actuel est d'automatiser le processus sur des SIG
 - modéliser les échanges entre l'atmosphère et la canopée urbaine. Il est nécessaire pour cela de modéliser au préalable les effets de la canopée urbaine sur les écoulements atmosphériques.
- c) **Satisfaire une nécessité, un besoin opérationnel ou stratégique / politique**
- le STP, Autorité Organisatrice des transports collectifs en Ile de France, souhaite renforcer sa capacité d'expertise et s'affranchir ainsi de sa dépendance vis à vis des entreprises de transport (RATP et SNCF) ou d'autres organismes publics (DREIF) qui étaient les seuls à disposer de modèles. Le projet ANTONIn a donc été mis en oeuvre au début des années 90.

- L'IAURIF, bureau d'études du Conseil Régional d'Ile-de-France, souhaitait disposer de son propre modèle de prévision de trafic pour préparer le Contrat de Plan Etat-Région
- [Répondre aux problèmes posés par] la mise en place de seuils de bruit réglementaires pour le trafic routier et ferroviaire
- There is need for a high-resolution microscale model to simulate the climatologic processes with respect to small scale changes.
- (...) pilotage de ces réseaux de plus en plus difficile pour les opérateurs humains, surtout si on prend en compte des préoccupations de performance économique (...). C'est ce qui a conduit les grands distributeurs français à nous demander de nous pencher sur ces problèmes
- Il était nécessaire de se doter d'outils de représentation efficaces et fiables : la représentation par ordinateur de tissus urbains a constitué l'un des moyens nouveaux sur lesquels un important effort de recherche a été entrepris ces dernières années.

d) Prévoir / anticiper, montrer les conséquences / les effets d'un événement ou d'une politique, tester des hypothèses, définir une politique dans un domaine, assister / aider les processus décisionnels

- prévoir l'évolution de la demande et de simuler les effets sur celle-ci de différentes mesures d'amélioration de l'offre.
- Le but est double : montrer les effets d'un événement (changement des taux des taxes locales, fermeture d'entreprises, création d'emplois, construction de logements, changement du POS, du COS) et exhiber les conséquences systémiques de ces événements sur les trois grands domaines indiqués:
- Projeter à long terme la demande de transport de personnes dans une région urbaine
- mettre au point un instrument qui permette de tester les effets de différentes situations initiales et de divers paramètres sur l'évolution des trames spatiales et fonctionnelles et de l'organisation hiérarchisée en niveaux des systèmes de villes.
- modèle de simulation des effets de mesures prises à l'échelle d'une agglomération afin d'aider à la décision pour une organisation logistique urbaine cohérente et intégrée aux politiques d'aménagement urbain
- jouer un rôle pédagogique, en aidant les agences de transport et les autorités locales à confronter les résultats de leurs actions potentielles
- besoin d'outils permettant la simulation à long terme (10 ans et au-delà) des effets potentiels de politiques de transport dans un contexte en pleine évolution
- permettre le test de politiques alternatives sous des hypothèses contrastées d'évolution du contexte socio-économique (par exemple la croissance économique, les revenus, etc.)
- Prévoir le niveau de pollution de l'air à partir d'un historique de données de terrain (cinq ans) en analysant les relations entre niveau atteint et paramètres météorologiques en présence
- définir une politique de prélèvements fiscaux et d'investissement dans une ville. Si cette ville fait partie d'un réseau tel que la DATAR essaye d'en développer, le modèle essaye d'en montrer les effets éventuels
- apporter des éléments quantitatifs pouvant être utilisés dans les processus décisionnels touchant à l'aménagement du territoire par les transports
- simulation du système stationnement-arrêts-livraisons et analyse du jeu des acteurs
- Impliqué dans l'étude et l'organisation d'espace, la société ATN est venu naturellement à la modélisation informatique dans le processus d'aide à la décision.
- Quelle politique entreprendre et pour quel coût ?
- Etant donné l'importance des investissements en jeu lors de la réalisation d'une infrastructure de transport, il est nécessaire pour le maître d'ouvrage de disposer d'outils d'aide à la décision pour l'évaluation économique des modifications de réseaux.

e) Calculer / simuler en général, assister la conception de projets en particulier

- modélisation du comportement des ouvrages d'art
- calcul d'écoulements industriels (préoccupation issue de EDF)
- calculer les températures de surface pour les éléments d'une scène urbaine modélisée, soumise à certaines sollicitations climatiques
- estimer l'impact des rejets urbains de temps de pluie en rivière
- simuler le comportement humain lors de déplacements en environnements urbains
- modélisation des écoulements atmosphériques et de la dispersion des polluants à petite échelle
- Réaliser un outil de simulation adapté à la complexité du milieu urbain (la plupart des logiciels actuels sont limités à des zones péri-urbaines).
- Fonctionnement des réseaux d'adduction d'eau potable et simulation du fonctionnement d'un réseau maillé sous pression sur 24h. Calcul du débit de pointe en réseau maillé ou non sous pression.
- Calcul des écoulements par la résolution des équations différentielles de la Mécanique des Fluides.
- Afin de concevoir des projets d'illumination et de les simuler par synthèse d'image, il est nécessaire de positionner précisément les sources lumineuses par rapport au modèle géométrique et d'en voir les effets sur le modèle en temps réel
- contrôle solaire des projets
- ces résultats doivent pouvoir être utilisés d'une part pour dimensionner des projets d'éclairage et prévoir la qualité d'une installation pour la visibilité, d'autre part s'intégrer dans un simulateur de conduite.
- Développement d'un outil d'aide à la décision environnementale pour le projet urbain

3.2.3 Conclusion

Pour l'ensemble des modèles, la prédiction et l'aide à la décision constituent les objectifs privilégiés de la modélisation. Ceci reste vrai dans tous les domaines et dans les deux pôles (géographie et physique), ce qui tend à laisser croire que les modélisateurs visent avant tout des objectifs opérationnels ou « de terrain ».

Les pôles se différencient quant à l'importance accordée à l'analyse et à la compréhension des phénomènes dans le processus de modélisation. Cet objectif est bien représenté dans le pôle physique (notamment dans les domaines de la physique et des risques), moins bien dans le pôle géographie. Ce résultat pourrait traduire une différence de nature de la modélisation entre les deux pôles, laquelle mériterait une discussion plus approfondie.

Par ailleurs, on note qu'un tiers des modèles inventoriés n'envisagent qu'un seul objectif (avec parmi eux une majorité visant seulement la prédiction et l'aide à la décision), un tiers visent deux objectifs simultanément (avec parmi ceux-ci, une forte majorité visant la simulation ou l'analyse en même temps que la prédiction et l'aide à la décision), et le dernier tiers vise les trois objectifs ensemble.

Enfin, outre les classes d'objectifs proposées a priori, plusieurs types d'objectifs plus précis ou originaux sont proposés, comme l'aide à la conception (à relier à l'aide à la décision), les tests stratégiques (à relier à la simulation), l'optimisation, l'expérimentation de sous-modèles ou encore la pédagogie.

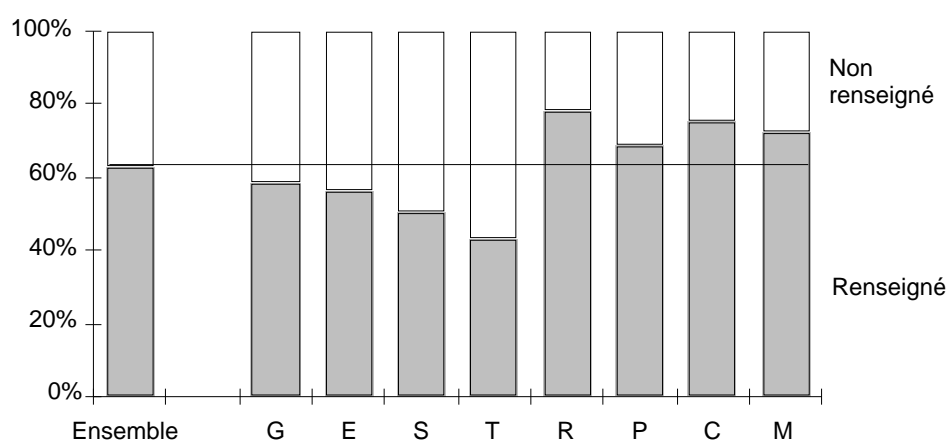
L'analyse des problématiques qui ont conduit au développement du modèle permet de dégager une formule générale du type « construire un outil capable de simuler les effets d'une politique de l'espace selon différents processus ... ». Pour être plus précis, les réponses permettent de distinguer plusieurs classes de problématiques qui ne s'excluent pas les unes des autres : modéliser pour comprendre certains phénomènes ; modéliser pour innover dans un domaine de connaissance ; modéliser pour satisfaire une nécessité notamment stratégique ou politique ; modéliser pour prévoir et anticiper ; modéliser pour calculer et assister la conception de projets en particulier.

Parmi ces diverses problématiques, les deux premières sont d'ordre scientifique et les autres ont un caractère plus stratégique ou opérationnel. Elles illustrent bien les résultats présentés ci-dessus concernant les priorités en matière d'objectifs.

3.3 Public visé, diffusion du modèle

3.3.1 Types d'utilisateurs

Ce point fait l'objet du champ 84, de type texte, du questionnaire Inventur. Celui-ci est moyennement renseigné (graphique ci-dessous), plutôt mieux dans les domaines du pôle physique et plutôt moins bien dans ceux du pôle géographie, notamment dans le domaine des transports.



État des réponses au champ 84

Pour un même modèle, plusieurs types d'utilisateurs peuvent être mentionnés. Le décompte des occurrences de mots, tous domaines confondus, donne la liste suivante :

- 10 chercheur(s)
- 7 ingénieur(s), architecte(s)
- 6 étudiants
- 4 urbaniste(s), collectivité(s)
- 3 aménageur(s), service(s), locales, espace(s), bureau d'étude(s)
- 2 concepteurs, réseau, technique(s), technicien(s), acousticien(s), chargé d'étude(s)

Le résultat est assez frappant : il laisse penser que les chercheurs produisent avant tout des modèles pour eux-mêmes, c'est-à-dire pour leur communauté scientifique. Ce point sera confirmé plus loin par le niveau d'utilisabilité du modèle, où l'on constatera que les modèles s'adressent avant tout à des « experts » du domaine, dont font partie les chercheurs.

Le décompte des mots par pôles fournit les résultats ci-dessous. Dans le pôle géographie :

- 2 aménageur(s), chercheur(s), locales, collectivités, espace(s), étudiants, chargé d'étude(s)

Dans le pôle physique :

- 7 chercheur(s)
- 6 ingénieur(s), architecte(s)
- 3 urbaniste(s), étudiants
- 2 réseau, service(s), acousticien(s), bureau d'étude(s)

Les priorités sont différentes suivant les domaines. Ainsi, les modèles du pôle géographie s'adressent à un public varié comprenant les aménageurs, les chercheurs, les chargés d'étude

des collectivités locales, les étudiants, etc. Dans le pôle physique, ce sont les chercheurs qui sont d'abord visés, puis les praticiens ingénieurs et architectes. Les urbanistes et étudiants sont cités de manière secondaire (toutes proportions gardées compte tenu de la faiblesse de l'échantillon).

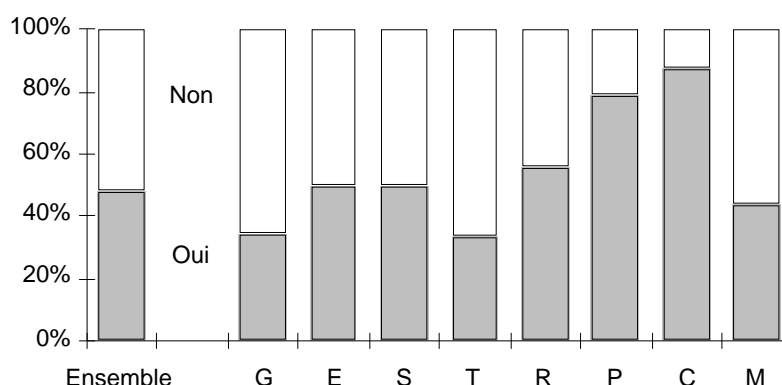
A travers ces résultats, on est conduit à penser que le développement d'un modèle peut satisfaire plusieurs publics : les chercheurs eux-mêmes et leur communauté scientifique, mais aussi les utilisateurs potentiels des modèles, puisque les concepteurs de modèles disent produire avant tout des outils dédiés à la prédiction et à l'aide à la décision (cf. plus haut, objectifs de la modélisation). Encore faut-il pour cela que le modèle développé au laboratoire puisse effectivement être diffusé et mis en oeuvre par d'autres que les chercheurs, dans un contexte de production. C'est ce que nous examinons ci-après en étudiant les modalités de diffusion des modèles.

On peut également supposer que l'opérationnalité d'un modèle n'est pas liée à sa diffusion et son utilisation pratique, en bureau d'étude par exemple. Au contraire, il est possible qu'un modèle de laboratoire, développé par des chercheurs pour une communauté scientifique, puisse être mis en oeuvre « in vitro » à des fins de diagnostic ou de simulation. Dans ce cas, le modèle peut être supposé opérationnel sans pour cela faire l'objet d'une diffusion hors de la communauté scientifique.

3.3.2 Diffusabilité et diffusion

• Diffusabilité

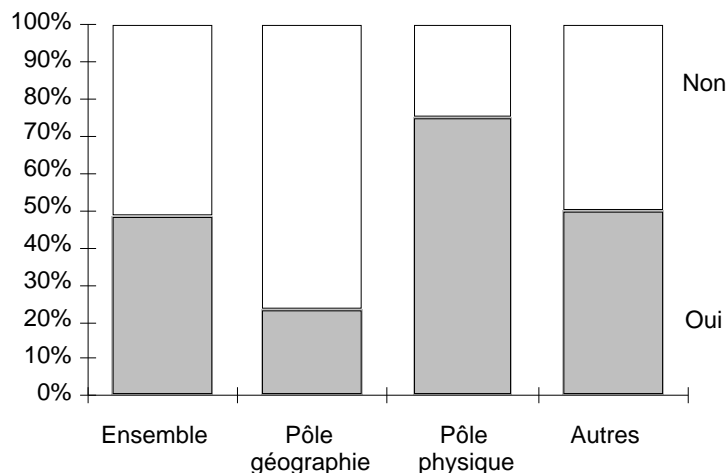
L'une des conditions essentielles pour la diffusion d'un modèle concerne son existence sous la forme d'un logiciel diffusable, que nous définissons comme la « diffusabilité ». Le modèle peut-il effectivement être diffusé en tant que logiciel indépendant ? Ce point fait l'objet du champ 4 de type choix unique du questionnaire Inventur. Les résultats synthétisés dans le graphique ci-dessous apparaissent nuancés : dans l'ensemble, les modèles sont partagés pour moitié entre diffusables (31 sur 64) et non diffusables (33 sur 64). Par domaines, on observe que les modèles des réseaux techniques, de la physique et des risques sont en moyenne plus souvent diffusables que ceux de la géographie, des transports et des morphologies urbaines.



Le modèle existe-t-il sous la forme d'un logiciel diffusable ?

Ces résultats sont confirmés et amplifiés dans le décompte par pôles (graphique ci-dessous, page suivante). L'on peut en déduire soit que les problématiques traitées dans le pôle physique sont plus près des préoccupations de terrain, soit que les développeurs au sein de ce pôle sont plus aptes à produire des outils diffusables que leurs homologues des sciences

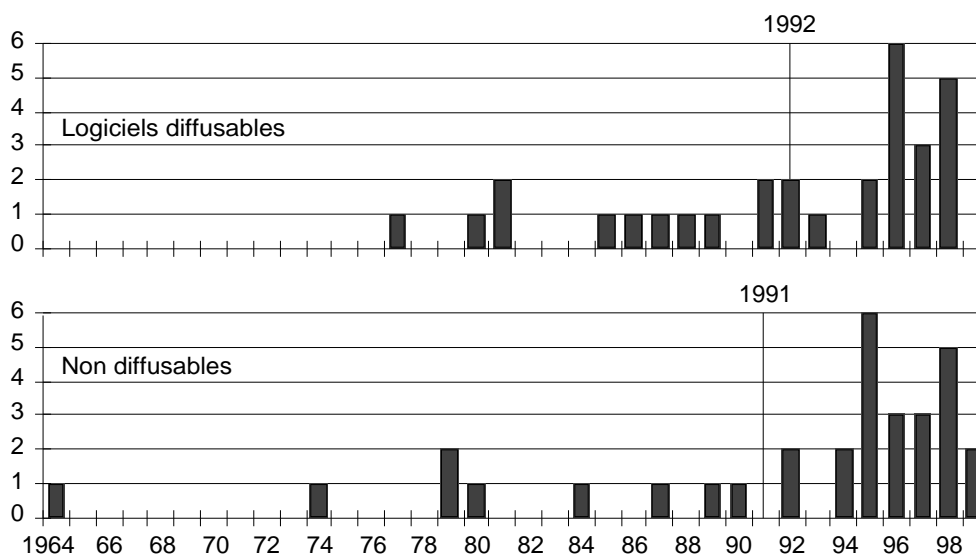
sociales. On peut également supposer que l'utilisation des modèles, ainsi que leurs conditions d'opérationnalité sont différentes suivant les domaines.



Diffusabilité des modèles par pôles

• Age et diffusabilité

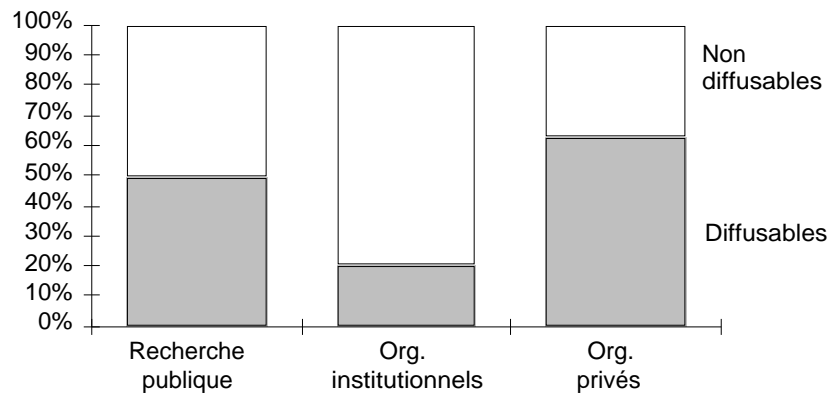
Existe-t-il une relation entre l'âge du modèle et sa diffusabilité ? Autrement dit, un logiciel doit-il faire ses preuves quelques années avant de devenir diffusable ? Pour les modèles recensés, aucune relation de ce type n'apparaît : la date de création moyenne des modèles diffusables et non diffusables est également 1991 (graphique ci-dessous). Il semblerait donc que le caractère diffusable ou non d'un modèle corresponde à un choix des modélisateurs plutôt qu'à un effet du temps. Ainsi, le développement d'un modèle semblerait s'effectuer avec un choix explicite ou implicite de diffusion future : l'on développerait plus facilement des modèles « pour soi » dans le pôle géographique, et des modèles « pour d'autres » dans le pôle physique.



Année de création et diffusabilité des modèles

• Origine et diffusabilité

On peut également supposer qu'il existe une relation entre l'origine du modèle (statut des auteurs) et sa diffusabilité. Le graphique ci-dessous confirme cette hypothèse : les modèles provenant du secteur privé existent majoritairement sous la forme de logiciels diffusables, tandis que ceux des organismes institutionnels sont majoritairement non diffusables. Le secteur de la recherche publique est partagé entre ces deux tendances.



Origine et diffusabilité des modèles

Ce résultat permet de supposer que les modèles issus du secteur privé et ceux des organismes institutionnels obéissent à des logiques différentes : les premiers seraient ainsi destinés à la vente ou à la production de services et, de ce fait, conçus d'emblée dans une perspective de diffusion. Les autres seraient plutôt développés pour l'usage interne de leurs auteurs, c'est-à-dire pour la production de résultats intéressant avant tout les activités des organismes institutionnels qui les produisent. Cette hypothèse expliquerait la plus forte proportion de modèle non-diffusables dans cette catégorie. Elle est également corroborée par d'autres résultats concernant les objectifs et motivations des modélisateurs (cf. plus avant).

• Diffusabilité et licence d'utilisation

Parmi les modèles existant sous forme de logiciels diffusables, les 2/3 (21 sur 31) sont dits « soumis à une licence », les autres étant accessibles librement (réponses au champ 5 du questionnaire Inventur). Cependant, la nature de la licence d'utilisation varie selon les modèles. L'analyse du champ 6 du questionnaire (précisions sur les conditions d'utilisation), permet de dégager quatre grandes classes de droits d'utilisation : a) l'utilisation soumise à un **contrat d'étude, une convention spéciale** avec les auteurs, ou encore l'accord des auteurs ou la reconnaissance de propriété intellectuelle et de création ; b) l'utilisation soumise à **l'achat d'une licence commerciale** ; c) l'utilisation soumise à l'acquisition, non du modèle lui-même, mais d'un outil lié au modèle ou du développement à partir de **bibliothèques soumises à licence** ; d) les droits résultant de la nécessité d'**acquérir certaines données** pour le modèle. L'encadré ci-dessous illustre ces différents cas à partir des réponses obtenues.

a) Utilisation soumise à un contrat d'étude, une convention spéciale avec les auteurs, ou encore l'accord des auteurs ou la reconnaissance de propriété intellectuelle et de création

- Contrat d'études à passer avec l'INRETS (minimum 50 kF) - 2
- Le LGCNSN de l'Ecole Centrale de Nantes dispose d'une licence spéciale enseignement, et peut également développer le code dans ses activités de recherche (convention spéciale) - 8
- Le logiciel de base (qui n'est plus maintenu) est libre de droit. Cependant celui-ci est issu d'un codéveloppement : Syndicat des Eaux d'Ile de France (SEDIF), Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN), Générale des eaux (GE) via Anjou Recherche (AR). Par conséquent, l'accord des 3 propriétaires doit être

<p>acquis pour obtenir une mise à disposition. Par ailleurs, un habillage sous Windows a été développé par AR, cet habillage est vendu. - 17</p> <ul style="list-style-type: none"> • Contractualisation avec le LET. - 31 • Convention de collaboration avec le laboratoire d'analyse des formes, Ecole d'architecture de Lyon. - 41 • Reconnaissance de propriété intellectuelle et de création. - 43, 44 • Le modèle peut être utilisé dans le cadre de collaborations avec ses auteurs. - 55 <p>b) Utilisation soumise à l'achat d'une licence commerciale</p> <ul style="list-style-type: none"> • Achat d'une licence a la société Simulog - 10 • Le logiciel, codéveloppé par Anjou Recherche (AR) et Wallingford Software Ltd (WSL, firme anglaise), est soumis à licence. La commercialisation est assurée par WSL qui est représentée en France par la société GEOMOD (Lyon). - 18 • Diffusion: JMG-Graphics http://www.jmg-graphics.com - 23 • UAM-IV est public disponible sur le Web, UAMV est payant. <p>c) Utilisation soumise à l'acquisition, non du modèle lui même, mais d'un outil lié au modèle ou du développement à partir de bibliothèques soumises à licence</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'utilisation du modèle global nécessite l'achat du logiciel MinUTP, de la société HCG. MinUTP est un logiciel de type "tool-box". - 5 • Nécessité d'acheter MAPINFO + HYPERCARD - 24 • Version PC avec licence d'utilisation incluant RunTime OpenInventor - 35 • Licence d'utilisation incluant le runtime de OPEN INVENTOR - 37 • Ce modèle est composé de 4 étapes. Les 3 premières sont un produit "maison". La 4ième utilise un logiciel commercialisé soumis à licence. - 46 <p>d) Nécessité d'acquérir certaines données</p> <ul style="list-style-type: none"> • Enquêtes à réaliser sur le terrain (environ 100 kF) ; • Les conditions d'utilisation ont trait à la constitution de la base de données. Certaines sont issues des recensements de l'Insee et peuvent y être achetées, mais d'autres nécessitent d'être saisies et traitées au préalable (horaires de trains). Certaines données proviennent de la SNCF (Abonnement travail), ce qui suppose un accord préalable. - 12
--

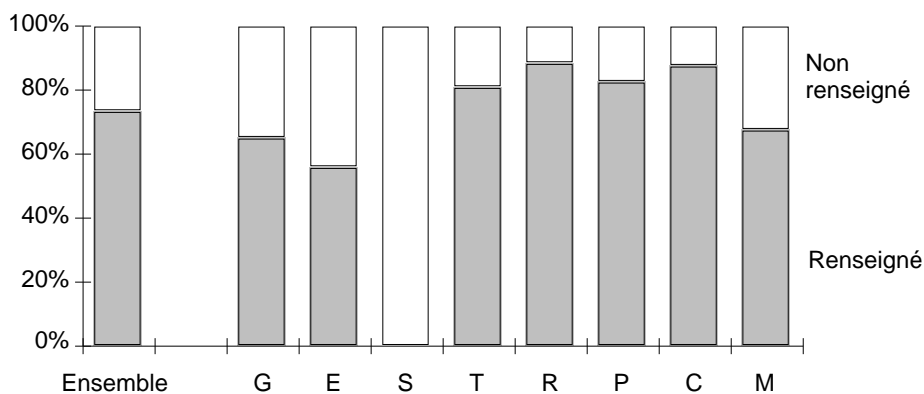
D'après ces résultats, les droits d'utilisation de certains modèles peuvent être prohibitifs, soit pour l'acquisition du modèle lui-même, soit pour celle des données ou des outils parallèles nécessaires. Cependant, ces situations semblent ne concerner qu'une minorité des modèles recensés.

• Diffusion effective

La diffusabilité n'entraîne pas nécessairement une diffusion effective des modèles, de même que certains modèles dits non diffusables peuvent en réalité faire l'objet d'une certaine diffusion en pratique (voir plus loin). Pour évaluer le degré de diffusion des modèles, on peut recourir aux réponses du champ 86 du questionnaire Inventur qui porte sur l'existence d'une communauté d'utilisateurs du modèle et ses modalités de fonctionnement.

Le champ est plutôt bien renseigné, notamment dans les domaines du pôle physique (graphique page suivante). Cependant, on note parmi les réponses un nombre important de réponses négatives de type : « non, pas de communauté d'utilisateurs ». L'analyse du contenu permet de constituer quatre sous-catégories de modèles parmi ceux qui renseignent le champ (29 sur 64) :

- les modèles faisant l'objet d'une **diffusion internationale** et d'un club d'utilisateurs également international (6 modèles) ;
- ceux faisant l'objet d'une **diffusion nationale**, avec un club d'utilisateurs existant ou en cours de construction (8 modèles) ;
- les modèles dont **la diffusion est restreinte à quelques équipes** ou organismes associés (la majorité des situations connues, soit 12 modèles) ;
- ceux dont la diffusion est **en cours**, de même que la création d'un club d'utilisateurs (3 modèles).



État des réponses au champ 86

L'encadré ci-dessous illustre ces catégories (extraits littéraux). Le numéro en fin de ligne renvoie à l'identifiant du modèle dans l'inventaire.

a) Diffusion internationale, club d'utilisateurs international

- Code à large diffusion internationale. - 54
- Oui. Le modèle est diffusé dans le monde entier (USA, Italie, entre autres). - 61
- utilisés par 9 équipes en europe - 15
- Autres équipes utilisant le modèle : Cambridge (UK) : Martin Center for Architectural and Urban Studies / LTMU / IFU (F) / BOULDER / COLORADO (USA) : Joint Center for Energy Management / Municipalités Toulouse, Londres, Berlin - 24
- Ecole Centrale + Grande Bretagne et Etats-Unis. - 22
- HYDROWORKS a été distribué à plusieurs équipes (France, Angleterre, Japon, USA, Australie, Belgique...). En France une première réunion d'utilisateurs a été organisée en 1998 par la Société GEOMOD. - 18

b) Diffusion nationale, club d'utilisateurs existant ou en cours de construction

- Utilisateurs du logiciel MinUTP : SNCF, RATP, STP, Ville de Paris - 5
- Club Cesar (Paris, Ouest france), nombreux bureaux étude - 8
- une centaine d'utilisateurs environ -13
- FLUPOL a été distribué à une vingtaine d'équipes. Il n'existe pas de club utilisateur. - 17
- Ce modèle est propre à la DREIF. Il fait l'objet de nombreux échanges avec les partenaires ayant des modèles de la même famille, principalement en IdF. Le logiciel servant à l'affectation est largement diffusé en France, notamment au sein du ministère de l'Equipement. Il fait l'objet de réunion entre utilisateurs. - 46
- + de 250 licences ; diffusion du journal papier Porteau-Info - 51
- + de 250 utilisateurs. Diffusion du journal papier Porteau-Info - 52
- Les 11 équipes du Groupement de Recherche 1102 du CNRS "Atmosphère urbaine sub-meso échelle" (SUB-MESO) - 43

c) Diffusion restreinte : quelques équipes de recherche ou organismes associés

- utilisation dans deux équipes de recherche (iMAGIS en France, Computer Graphics Lab. au MIT, aux USA) - 1
- l'INRS-Urbanisation à Montréal qui a contribué à son développement - 9
- université d'Iowa aux Etats-Unis - 27
- Oui auprès de l'industriel et d'une société de service associée. - 29
- la communauté d'utilisateurs est limitée aux auteurs et aux commanditaires du modèle. - 33
- Oui, mais de façon restreinte - 35
- oui, de manière modérée - 37
- Entre France Télécom, l'INRIA, l'ENST, et quelques autres laboratoires universitaires, le nombre d'experts d'appuyant sur la géométrie aléatoire pour modéliser les réseaux de télécommunications est entre 20 et 30 en France. - 42
- Diffusion à l'Ecole Centrale de Lyon (Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, Richard Perkins), au LCPC (Division Eau, Frédérique Larrareté), au Laboratoire CERMA, Ecole d'Architecture de Nantes (Franck Raymond), à l'Institut de Géographie de l'Ecole Polytechnique de Zurich (ETHZ). - 44
- Diffusion limitée aux laboratoires CERMA, DAH, IRIN. - 45

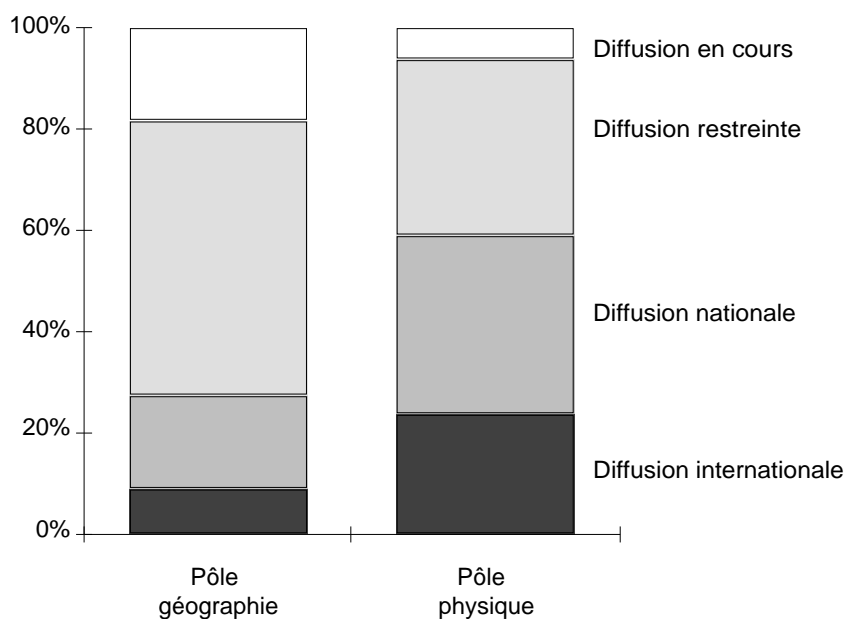
- Il existe plusieurs équipes utilisant ou ayant utilisé le modèle. Il y a un réseau informel d'utilisateurs structuré autour de Günter Haag à Stuttgart et de nombreuses applications au niveau des organisations territoriales en Allemagne. - 55
- Le modèle théorique est diffusé dans la communauté de chercheurs en généralisation. - 57

d) Diffusion en cours, club en cours de création

- Le modèle est en cours de diffusion auprès de nos partenaires de recherche (Université d'Athènes, Université de Seville, BRE). Il sera mis à la disposition du public à la fin de cette année. - 7
- Communauté embryonnaire, composée de quelques étudiants l'utilisant pour des études et recherches. - 56
- Non, mais diffusion prévue dans le cadre des activités du GDR Libergéo. - 62

• Diffusion par pôles

Si l'on reporte les données précédentes par pôle, on obtient les résultats synthétisés dans le graphique ci-dessous. On note qu'à l'instar de la diffusabilité, la diffusion effective est un fait nettement plus prononcé dans le pôle physique, où près de 60 % des modèles diffusés le sont au niveau national ou international. A l'inverse, la majorité des modèles du pôle géographie sont diffusés de manière restreinte. Seuls le quart d'entre eux sont diffusés au niveau national ou international.



Diffusion par pôles (pour les modèles qui renseignent le champ)

Pour relativiser ces propos, on notera qu'une partie des modèles qui renseignent le champ et décrivent l'état actuel de leur diffusion sont en même temps réputés « non diffusables » dans le champ 4 du questionnaire (ID 1, 5, 9, 22, 27, 29, 33, 42, 45, 46, 55, 57). On remarque que ces modèles appartiennent majoritairement au pôle géographie (9 sur 12). Il peut s'agir d'outils logiciels à l'état de maquettes, ayant fait l'objet d'une diffusion importante mais dont la diffusabilité est jugée insuffisante ou n'est pas souhaitée par leurs auteurs (ce pourrait être le cas des modèles CIT, VUEMS, ASTUCE, MODUS, Modèle stratégique de déplacements de l'agglomération lyonnaise). Il peut s'agir également de modèles théoriques, qui ne sont pas diffusables en tant que tels, mais dont la diffusion existe cependant au travers de mises en oeuvre locales (Modèle démographique de projection à long terme, Modèle intra-urbain de Peter Allen, Un modèle synergétique de la dynamique d'un système de villes).

• Age et diffusion

La diffusion effective d'un modèle est-elle corrélée à son âge, peut-elle être comprise comme un effet du temps ? Pour répondre à cette question, on peut noter les années de création des modèles appartenant aux différentes catégories décrites ci-dessus. Nous observons que :

- les modèles du groupe a) ont été créés entre 1980 et 1996, avec une année moyenne de création en 1989
- ceux du groupe b) entre 1977 et 1996, avec une année moyenne en 1987
- ceux du groupe c) entre 1974 et 1997, avec une année moyenne en 1992
- ceux du groupe d) entre 1993 et 1998, avec une année moyenne en 1995

Les modèles les plus jeunes sont ceux qui bénéficient de la moins bonne diffusion, ce qui est conforme à l'intuition. Pour les autres, il semble difficile d'établir de corrélation entre l'âge et la diffusion. Ainsi, les modèles diffusés internationalement (groupe a) sont en moyenne plus jeunes que ceux diffusés sur le plan national. On peut penser là encore que la diffusion des modèles résulte plus d'une volonté de leurs auteurs que du seul effet du temps.

3.3.3 Conclusion

• Sur le public visé

Les chercheurs produisent avant tout des modèles pour eux-mêmes, c'est-à-dire pour leur communauté scientifique, notamment dans les domaines du pôle physique. Ces modèles (qui s'adressent avant tout à des experts du domaine, comme confirmé plus loin), participent donc au mouvement de la connaissance. La modélisation apparaît alors comme l'un des outils du travail de recherche, tant sur le plan appliqué (la production du modèle) que sur le plan fondamental (la construction de connaissances nouvelles). La production du modèle comme outil pratique pour d'éventuels utilisateurs finaux pourrait, dans ce contexte, être envisagée comme un effet résiduel de la recherche. En effet, tous domaines confondus, les ingénieurs et architectes, les étudiants, les aménageurs, urbanistes et autres praticiens de l'espace urbain, sont cités comme utilisateurs potentiels, derrière les chercheurs eux-mêmes.

Cependant, les modélisateurs disent produire avant tout des outils dédiés à la prédiction et à l'aide à la décision, tandis que les objectifs relatifs à la production de connaissances (analyse et compréhension des phénomènes) sont les moins bien représentés (cf. § 3.2.1). Y aurait-il contradiction entre les objectifs annoncés et la réalité effective de la modélisation ?

Pour lever ces ambiguïtés, on est conduit à penser qu'un même modèle est capable de satisfaire plusieurs publics : les chercheurs eux-mêmes et leur communauté scientifique, mais aussi les utilisateurs potentiels des modèles que sont les responsables et praticiens de l'espace urbain. Dans ce sens, on est en droit de supposer qu'il existe deux modalités d'application opérationnelle des modèles : en premier lieu, l'opérationnalité « in vitro » (au laboratoire) qui conduit les chercheurs, sous diverses modalités de contrats d'étude ou de convention spéciale, à faire bénéficier les praticiens du champ urbain des compétences de leur modèle, notamment à des fins de diagnostic et de simulation. Dans ce contexte, ce n'est pas tant l'outil lui-même que les résultats qu'il produit qui constituent l'enjeu opérationnel de la modélisation. Le modèle satisfait alors ses auteurs chercheurs comme il peut satisfaire les praticiens, utilisateurs potentiels de ses résultats.

De l'autre côté, un autre mode d'opérationnalité consiste en la diffusion effective du modèle comme outil, susceptible d'être mis en oeuvre hors du laboratoire et par d'autres que ses concepteurs. L'enjeu opérationnel est alors l'outil logiciel lui-même, dont les auteurs ne contrôlent plus les mises en oeuvre potentielles et l'appropriation par les utilisateurs finaux.

L'adaptation éventuelle de l'outil ainsi que la formation des utilisateurs sont alors intimement associés à la diffusion du modèle.

• Sur la diffusion et l'opérationnalité des modèles

Dans ce cadre, nos interrogations sur les relations entre l'opérationnalité et la diffusabilité d'un modèle (son existence sous la forme d'un logiciel diffusable) ne concernent qu'une partie des modèles : ceux qui prétendent effectivement à l'opérationnalité par la diffusion hors laboratoire. Naturellement, la diffusabilité est en partie liée à l'origine du modèle. Ainsi, les modèles issus du secteur privé existent majoritairement sous la forme de logiciels diffusables, tandis que ceux des organismes institutionnels sont majoritairement non diffusables ; le secteur de la recherche publique est partagé entre ces deux tendances.

Cependant, la diffusabilité semble plus encore intimement liée au domaine de compétence des modèles. On observe ainsi que les modèles du pôle physique sont en moyenne beaucoup plus souvent diffusables que ceux du pôle géographie. Par ailleurs, la diffusabilité ne semble pas liée à l'âge du modèle si bien que l'on ne peut invoquer l'expérience ou l'effet du temps pour expliquer les différences constatées.

Il apparaît donc que la diffusabilité d'un modèle résulte d'un choix de ses auteurs plutôt que d'un effet du temps, et ce choix serait en partie lié au domaine d'application : l'on développerait plus facilement des modèles « pour soi » (non diffusables) dans le pôle géographie, et des modèles diffusables « pour les autres » dans le pôle physique. Les deux formes d'opérationnalité décrites plus haut seraient donc plus ou moins propres aux cultures scientifiques et pratiques. Dans certains cas et notamment dans les domaines du pôle géographie, l'utilisation opérationnelle d'un modèle pourrait se faire au laboratoire, par les experts du domaine, via un contrat d'étude ou une convention avec le commanditaire. Dans d'autres cas, et notamment dans les domaines du pôle physique, la mise en oeuvre opérationnelle des modèles serait subordonnée à leur diffusion vers les praticiens.

Les résultats concernant la diffusion effective des modèles vont dans ce sens. Moins de la moitié des modèles inventoriés font état d'une diffusion effective. Parmi ceux-ci, une petite majorité cumulée bénéficient d'une diffusion nationale ou internationale (14 modèles), tandis qu'une minorité importante (12 modèles) présente une diffusion restreinte à quelques équipes de recherche ou organismes associés. L'existence d'un club d'utilisateurs est relative au niveau de diffusion du modèle.

Les modèles les plus jeunes font naturellement état de la moins bonne diffusion. Pour les autres, il semble difficile d'établir une corrélation entre l'âge et la diffusion si bien qu'on est en droit de penser que la diffusion d'un modèle, comme la diffusabilité, résulte plus d'une volonté effective de ses auteurs que d'un effet du temps.

De même, à l'instar de la diffusabilité, la diffusion effective des modèles est un fait plus prononcé dans le pôle physique que dans le pôle géographie. On remarque également qu'il existe dans le pôle géographie (mais aussi dans le pôle physique) un nombre important de modèles effectivement diffusés mais en pratique réputés non diffusables (ils n'existent pas sous la forme de logiciels diffusables). Il peut s'agir d'outils logiciels à l'état de maquettes, ayant fait l'objet d'une diffusion importante mais dont la diffusabilité est jugée insuffisante ou n'est pas souhaitée par leurs auteurs ; il peut s'agir également de modèles théoriques, qui ne sont pas diffusables en tant que tels, mais dont la diffusion existe cependant au travers de mises en oeuvre locales. Ainsi, diffusion effective et diffusabilité ne semblent pas recouvrir des réalités parallèles pour les modélisateurs.

4.

Capacités et limites opérationnelles des modèles

Les modèles urbains sont-ils opérationnels ?

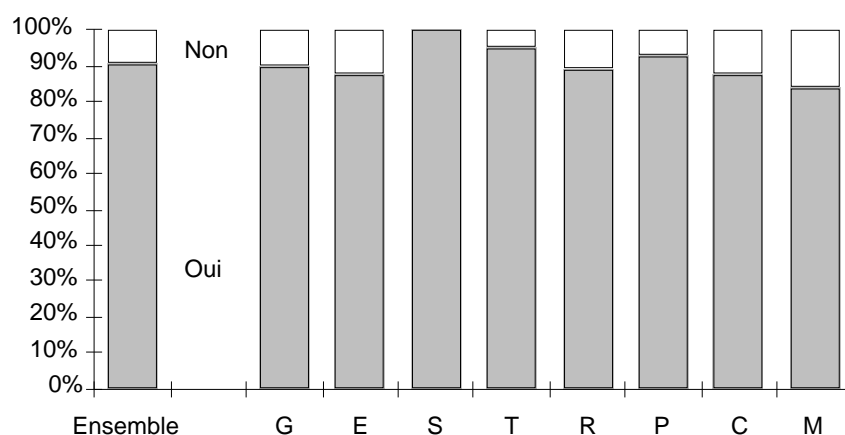
4.1 Opérationnalité et utilisabilité

En complément des conclusions précédentes, nous examinons ici différents critères qui permettent de juger des possibilités d'application des modèles dans un cadre opérationnel. Il s'agit en premier lieu d'indices permettant de juger leurs capacités mais également leurs limites opérationnelles actuelles ; en second lieu des questions d'utilisabilité, notamment hors laboratoire, incluant les problèmes relatifs au temps de formation aux modèles.

4.1.1 Opérationnalité

• Par rapport à ses objectifs, le modèle est-il opérationnel ?

Cette question directe constitue l'intitulé du champ 35 du questionnaire Inventur, de type choix unique Oui / Non. Les résultats sont présentés dans le graphique ci-dessous. Il semble que la question ait été mal formulée, ou le mot « opérationnel » mal interprété, puisque la très grande majorité des modèles tous domaines confondus sont dits opérationnels (58 / 64).



Par rapport à ses objectifs, le modèle est-il opérationnel ?

Six modèles seulement sont dits non opérationnels (ID 3, 22, 34, 39, 50, 63). Ils sont répartis dans tous les domaines et ne présentent pas de caractéristiques franches communes. Ce sont soit des modèles théoriques (Modèle intra-urbain de Peter Allen, Adaptation du modèle de potentiel) qui n'existent pas vraiment sous la forme d'un logiciel diffusable ; soit des modèles récents (IDOS, ORPHEA, L'Elément Hydrologique) qui peuvent être toujours en cours de développement. On peut également supposer que les rédacteurs du questionnaire pour ces modèles ont une définition de l'opérationnalité plus restrictive que celle de la moyenne.

Dans tous les cas, les réponses à cette question ne permettent pas d'évaluer clairement la réelle opérationnalité des modèles inventoriés. Tout au plus permettent-ils de conclure que les concepteurs et développeurs de modèles ont une grande confiance dans leur production et qu'ils envisagent facilement le passage du laboratoire au terrain. A moins qu'ils ne signifient plus simplement, à travers cette question au vocabulaire ambigu, que leur modèle fonctionne effectivement en tant qu'outil logiciel (ce que ne feraient alors pas les modèles dits non opérationnels).

• Capacités et limites opérationnelles

La description des capacités et limites opérationnelles du modèle fait l'objet du champ 36 du questionnaire Inventur. Il s'agit d'une question de type texte renseignée par 42 modèles sur 64 (65 %). Le décompte des occurrences de mots fait apparaître la liste ci-dessous. Aucun élément pertinent ne semble se dégager de ces résultats.

8 limite(s)
7 application(s)
6 valeurs, type(s), compte
5 reseau, objectif, operationnel(s)
4 processus, fonction(s), cours, differentes, possible(s), noeuds, polluants, flux, simulation, analyse, outil(s), etude(s), donnees, encore
3 incertitude, resultat(s), evolution(s), previsions, mesure(s), optimisation, existe, reproduire, tenu, difficile, nombre, comportement(s), dynamique(s), niveau, modelisation, taille, forme(s), utilisation, calcul(s), temps, operationnelle(s), bonne, base, depend, necessite, regionale, adapte(s), hypotheses, probleme(s), zone(s), developpement

L'analyse de contenu paraît plus intéressante. S'agissant des capacités opérationnelles, on constate qu'elles sont très relatives aux modèles. Pour ce qui est des limites, on cerne trois catégories qui peuvent être exprimées comme suit : a) les **limites intrinsèques à la modélisation** qui sont relatives à des problèmes non encore résolus ; b) des limites résultant du fait que **certaines hypothèses ou méthodes de calcul n'ont pas encore été validées** ; c) des limites dues à des **difficultés pratiques** dans l'utilisation du modèle. L'encadré ci-dessous illustre ces différents cas.

a) Limites intrinsèques à la modélisation, problèmes non encore résolus

- Zone limitée dans l'espace
- Problème de convergence des scénarios
- Pas encore de couplage avec l'humidité, la rugosité des surfaces
- Représentation des phénomènes non entièrement satisfaisante
- Le nombre maximum de noeuds autorisé est de 100
- Le modèle actuel ne prend pas en compte la luminance directionnelle
- Ne fonctionne pas pour le moment sur toutes les formes de polygones et de toitures
- Incertitude élevée des valeurs d'émission (qui sont des données d'entrée du modèle) et notamment, mauvaise connaissance des émissions de composés organiques volatils
- Idée approximative du résultat (calculs d'illumination approchés)
- L'intégration du modèle de sol urbain n'est pas achevée
- Etc.

b) Certaines hypothèses ou méthodes de calcul n'ont pas encore été validées

- Le passage à la prédiction et à l'aide à la conception nécessite un temps d'ajustement du modèle et de retour sur le terrain pour s'assurer de la "robustesse" de certains paramètres lors des changements de contexte
- Il reste à tester ses limites en termes de taille de réseau
- Incertitude importante sur les mesures en polluants dans la réalité : d'où une difficulté à valider les résultats des modèles de chimie / transport de polluants de l'air
- Les hypothèses de base du modèle (répartition des noeuds de réseau selon un processus de Poisson spatial) n'a pu faire, pour le moment l'objet d'une validation systématique
- Etc.

c) L'utilisation du modèle peut présenter certaines difficultés pratiques

- Gourmand en données de terrain
- Puissance de calcul requise importante
- Temps de calcul important, place mémoire nécessaire importante
- Lourdeur au niveau du fonctionnement du fait de l'importance et de la complexité de la base de données
- Dépend beaucoup de la connaissance (...) du sous-sol et de l'expérience de l'utilisateur, nécessite une très bonne maîtrise des outils de la mécanique fondamentale et de l'analyse numérique
- Nécessite un travail de calage spécifique dans le secteur d'étude
- Le calibrage du modèle se fait par essais et erreurs et est de ce fait long et imprécis
- En cours de développement de l'interface homme-machine
- Le modèle n'est pas encore accompagné d'une interface conviviale, ce qui le rend assez difficile d'accès
- Etc.

• Limites temporaires et limites permanentes

Le champ 59 du questionnaire permet de préciser les principales limites du modèle et, en particulier, de notifier lesquelles peuvent être considérées comme permanentes (intrinsèques au modèle, par la formalisation ou les méthodes choisies, par exemple) ou temporaires (dépendantes de problèmes susceptibles d'être résolus à moyen terme). Dans sa formulation, ce champ recouvre assez bien la question précédente concernant les capacités et limites opérationnelles des modèles.

Le décompte des occurrences de mots, tous domaines confondus, donne la liste suivante :

```
43 limite(s)
13 donnees
8 simulation(s)
7 calcul(s), temporaire(s), principale(s), permanente(s)
6 forme(s), processus, temps
5 dues, nombre, resolution, compte, probleme(s), comportement(s)
4 resultats, domaine, application(s), taille, analyse(s), utilisation,
  technique(s), proviennent, milieu, liee(s), evolution(s)
3 phase, important(s), chimie, base(s), spatiale(s), maniere, objet, type(s),
  incertitude(s), agglomeration(s), terrain, systeme(s), limitee, autre(s),
  point(s), definir, transport(s), niveau, permet, ordinateurs, memoire,
  noeuds, contraintes, effet(s), prise, hypothese(s), espace(s), difficile,
  prevision, etude, parametres, phenomenes, forte(s)
```

En regard de ces résultats, il semble que les limites soient en nombre équivalent temporaires et permanentes. Cependant, les réponses semblent intimement liées à chaque modèle et difficiles à analyser globalement. Les termes cités dans la liste, pas plus que l'analyse du contenu des réponses, ne permet de statuer de manière globale sur ce point.

• Perspectives

Les perspectives de recherches à effectuer pour améliorer le modèle font l'objet du champ 60 du questionnaire. Ce champ est renseigné par plus de 87 % de l'ensemble des modèles, et par la totalité des modèles des domaines de l'économie, des réseaux techniques et des risques. On remarque également que les rédacteurs du questionnaire sont particulièrement prolixes dans ce champ, avec une moyenne de plus de 30 mots par réponse. Ces résultats dénotent une forte motivation des modélisateurs pour la poursuite du travail entamé.

L'analyse de contenu permet de dégager quatre situations différentes quant aux perspectives de recherche : a) pour une minorité de modèles (3 occurrences), aucun développement nouveau n'est prévu ; b) pour d'autres, les travaux futurs visent plutôt **la validation, la calibration ou l'expérimentation** du modèle (8 occurrences) ; c) pour une part importante, sont prévus des travaux visant plutôt **l'optimisation, la simplification ou l'amélioration de certaines fonctionnalités** du modèle (14 occurrences) ; d) enfin, pour la majorité, les perspectives concernent **l'extension, la modification ou l'enrichissement du modèle** actuel (28 occurrences).

L'encadré ci-dessous illustre ces différentes situations.

a) Pas de développement prévu

- pas de nouveau développement prévu - 2
- l'étude du cas de Lyon est finalisée. Aucun développement n'est prévu au jour d'aujourd'hui, mais la modélisation transport-usage du sol continue d'intéresser le CERTU. - 3
- Les recherches sur ce sujet spécifique des réseaux d'eau sont actuellement arrêtées dans notre laboratoire faute d'un intérêt suffisant de la part des industriels concernés. Les recherches méthodologiques en optimisation se poursuivent, notamment sur la prise en compte d'aléas (optimisation stochastique). Il y aurait certainement encore beaucoup de choses à faire spécifiquement sur les réseaux d'eau (à commencer par le calage automatique de modèles et l'élaboration automatique de modèles à différentes échelles spatiales à partir d'un modèle détaillé unique). - 29

b) Validation, calibration, ou expérimentation du modèle

- - calibration des mesures relatives a la qualite des espaces ouverts (confinement, longueurs de vue) sur base d'enquetes psycho-sociales. - validation des interfaces de visualisation aupres d'utilisateurs neophites. - 7
- gros travail actuel de validation sur divers ouvrages - 8
- Souettre le logiciel à des usages pratiques pour le perfectionner. - 20
- prise de contact avec des collectivités locales pour appuyer le modèle sur des données réelles; ajouts d'autres domaines (transports, pollution, etc..) - 21
- Calage du modèle sur une base de donnée plus large. Affinement des relations fonctionnelles. Introduction des spécificités des diverses agglomérations. Prise en compte de l'ensemble des flux de déplacements de biens : flux annexes (déménagements, approvisionnement des chantiers, transport des déchets, divers services publics) et déplacements d'achats des particuliers. Un programme de recherche de 18 mois et une thèse sur ce sujet viennent de débiter. - 40
- Validations d'ensemble sur des expériences à l'échelle de la rue. Validation du sous-modèle de turbulence induite par les véhicules. - 44
- (...) il serait intéressant d'étudier avec le système MEDINA d'autres exemples de morphologies urbaines. Ces expérimentations permettraient de dégager d'autres types de polygones et de toitures qui n'ont pas été étudiées et à adapter les techniques proposées pour la modélisation à ces types de bâtiments. Un autre point important à considérer est l'utilisation d'autres types de documents (...) - 59
- On cherche à produire une version interactive du modèle qui permette son expérimentation en grand nombre par des non spécialistes des systèmes multi-agents. - 64

c) Optimisation, simplification ou amélioration de certaines fonctionnalités

- Recherches en cours : allègement des algorithmes qui comportent beaucoup de phases de resolution iteratives. Comparaison algorithme iteratif-algorithme direct. Ceci est a rapprocher des etudes de sensibilite. Aboutissement debut 99. En cours mais laisse temporairement de cote: passage au regime variable. - 11
- Il reste à unifier les différents morceaux de programme en un seul langage pour permettre une utilisation simplifiée. - 12
- amélioration de l'initialisation et de conditions aux limites - 14, 15
- Actuellement les règles de fonctionnement des mobiles sont codées à l'intérieur du logiciel de simulation. A terme, ces règles doivent être externalisées pour être facilement modifiées ou éventuellement en ajouter/supprimer. Ces travaux s'établissent dans une perspective de 6 à 12 mois. - 16
- Recherches en point d'achèvement : Amélioration du module de lessivage, Amélioration du module de transport des sédiments en collecteur. - 17
- Recherches: Amélioration du module de lessivage (en point d'achèvement), Amélioration du module de transport des sédiments en collecteur (en point d'achèvement). Liaison avec cartographie (disponible avec INFOWORKS et en cours avec GIRIS) - 18
- Le modèle es actuellement converti sous WINDOWS 95 ce qui permettra d'augmenter la capacité de description du réseau et des accès aux transports collectifs. Le modèle devrait être opérationnel en 1999. - 19
- Il reste à améliorer les méthodes de calibrage et l'interface. - 22
- * Accelération des calculs, de manière à intégrer la luminance dirrectionnelle des matériaux (comportement non lambertien). * Intégration des textures das les images, sans perte de qualité photométrique et colorimétrique. - 23
- La réalisation d'une version plus conviviale est envisagée en collaboration avec la société ESRI. Une réflexion est également menée sur le développement d'autres outils d'aide à la décision destinés aux agences d'urbanisme. - 32
- Ce type de modèle a également été développé par la Semaly sur Grenoble, Marseille et Bordeaux. Plusieurs améliorations ont été élaborées, notamment sur la prise en compte explicite du mécanisme de pas à pas sous forme de modèles incrémentaux. Une nouvelle version du modèle stratégique de Lyon est en cours de préparation. - 33
- - Ajout d'un terme de diffusion à l'équation aux dérivées partielles régissant les concentrations de désinfectant le long d'une conduite (si le phénomène s'avère non négligeable). - Possibilité de choisir un ordre de réaction différent de 1. La perspective première du travail, cependant, concerne l'optimisation des concentrations injectées dans le réseau, avec le modèle d'optimisation obtenu grâce au modèle de simulation présenté ici. - 53
- - Codage d'algorithmes existants sur d'autres plates-formes. - Conceptions de nouveaux algorithmes contraints. - Détection de nouvelles mesures d'analyse spatiale. - Effort à fournir sur les interactions entre situations et la création d'entités méso. - Etude des procédures d'initialisation. Echéances : 3-5 ans pour un système accessible. - 57
- Améliorer les outils de manière à mieux les situer dans le domaine de l'aide à la conception. - 58

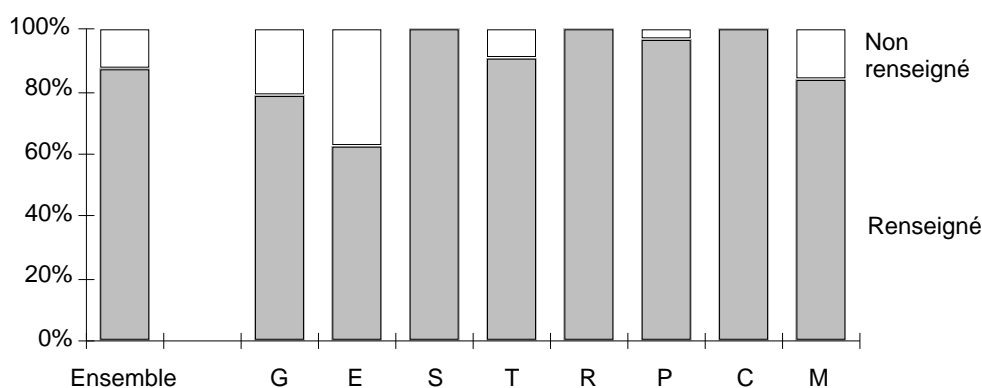
d) Extension, modification ou enrichissement du modèle

- Etude de nouvelles plantes, problemes du parallelisme, qualites des bois, systemes radiculaires - 4
- Il faudrait pouvoir passer d'une modèle séquentiel à un modèle à rétroaction. - 5

- Il faut essayer d'autres matrices d'élasticité et faire tester le logiciel par des professionnels. Opération déjà commencée. - 6
- Introduction des facteurs économiques (revenu et prix) et d'offre en Ile-de-France (VP et TC) et en province (TC) courant 1999. - 9
- Prise en compte des effets de végétation (modélisation par un milieu poreux) - 10
- Diffusion pour les surfaces urbaines. Simulation binaurale sonores de bruits en milieu urbain - 13
- extension du modèle pour avoir une représentation exhaustive de l'espace urbain afin de pouvoir prendre en compte le comportement des piétons - 27
- - Dans version 2, travail sur des entités géographiques ensemblistes (union, intersection ...) baptisées "sélections normées" - recherche sur méthodes d'ADM permettant la préférence faible, l'incomparabilité ... - 24
- Spécification du comportement des piétons - 28
- Remplacement de la distance par le temps d'accès au centre de l'espace. Thèse d'Université en cours. - 30
- Génération automatique de scripts de calcul des séquences d'images virtuelles utilisant les ressources logicielles du commerce (module non temps-réel). Le modèle fonctionne dans un environnement UNIX mais pourrait fonctionner sous windows NT. - 34
- Gestion des transparences. - 37
- Recherche sur l'introduction de politiques urbaines par le biais des pondérations. - 39
- - Application d'une manière systématique à un corpus de formes urbaines. - Programmation du modèle pour des formes tridimensionnelles. - 41
- Le travail d'application des résultats théoriques obtenus depuis les premiers résultats (traitement des processus de Poisson hétérogènes par changement d'espace, pavage du plan autre que selon le critère du noué le plus proche, lois tirées des résultats donnés par l'optimisation stochastique au lieu de l'optimisation paramétrique utilisée jusqu'ici, ...) n'a pas encore réellement commencé. Par ailleurs, de travaux statistiques sur la nature des processus stochastiques susceptibles de modéliser la répartition des noeuds de réseaux, à différentes échelles, sont en cours. - 42
- Version 3 en cours de développement (1998-2000) : - maillage curviligne généralisé, - chimie de nuit, - modèle de dépôt sec, - modèle de canopée urbaine, - intégration du modèle ASTUCE, - préprocesseur météorologique instationnaire, - sous-modèle de chimie-transport à proximité des sources ponctuelles. - 43
- Recherches en cours : simulation numérique d'écoulements au dessus de tissus urbains périodiques en vue de construire des lois de paroi adaptées. - 45
- La version Modus 2 en cours d'élaboration doit prendre en compte l'élasticité de la demande de transport aux différentes variantes. - 46
- Constant development: include roof top greening, particle dispersion, terrain effects - 47
- Actuellement, je travaille sur le site du Mans. Mes perspectives de simulation se portent davantage vers une approche plus dynamique (suivi d'un panache polluant sur la ville à partir d'un modèle Gaussien de diffusion d'un panache). L'intégration de code "thermodynamique" me semble indispensable pour parvenir à une véritable simulation du phénomène. - 49
- - Sur le modèle de propagation : recherche en cours sur le choix du coefficient de diffusion et son lien avec les indicateurs morphologiques urbains, puis généralisation / validation du modèle de diffusion à un grand nombre de configurations urbaines (rues avec intersections, rues de largeur variable, rond-points, places, quartier...). Prise en compte des effets météorologiques et du rayonnement sonores par les ouvertures (par le toit...) ... - Sur les modèles de sources : recherche en cours sur la caractérisation et la modélisation des sources d'origines humaines. - Sur les indicateurs morphologiques : recherches sur le lien entre le degré de fractalité du tissu urbain et le degré de diffusion de l'énergie sonore. Utilisation de modèles fractals aléatoires pour la simulation de configurations urbaines complexes. Travail de typomorphologie urbaine. - 50
- - Introduction de la formule de Colebrook - Consommation dépendante de la charge. - 51
- - Introduction de la formule de Colebrook - 52
- - Recherches sur la sensibilité à des fluctuations dans les valeurs des paramètres. Recherches pour estimer les valeurs des paramètres même en l'absence des matrices de migration interurbaines. - 55
- Les perspectives sont nombreuses et s'articulent autour des projets de recherche qui émergent ou émergeront dans le champs de l'analyse de l'offre transport et de ses implications en termes d'aménagement du territoire. Les modèles sont en perpétuelle évolution pour répondre à ces demandes nouvelles. Un développement en cours porte sur l'adjonction de données sur la congestion pour les transports routiers. - 56
- - Relocaliser et compléter l'inventaire des sources ponctuelles d'émission en entrée du modèle. - Extension du domaine spatial. - Autre épisode de pollution avec fabrication d'un nouvel état météorologique à un an environ. - 61
- Segmentation des populations, afin de rendre compte plus précisément de pratiques de déplacement et de stratégies résidentielles plus diversifiées. Enrichissement des graphes en termes de nombre de noeuds et d'arcs, pour une description plus fine de l'espace. Intégration de tous les modes de transport dans le module dynamique concernant les réseaux de transport (seul le processus d'évolution du réseau routier et autoroutier est actuellement développé). - 62
- La représentation de certains processus physiques mériterait des recherches approfondies. C'est particulièrement le cas du comportement des surfaces imperméabilisées (projet dans le cadre du Programme National de Recherches en Hydrologie), et du processus d'évapotranspiration en milieu urbain. - 63

• Exemples d'applications

Les capacités et limites opérationnelles d'un modèle peuvent également se juger au travers des applications effectives du modèle en situation « concrète ». Les exemples d'application font l'objet du champ 87 du questionnaire Inventur. On note que ce champ est très bien renseigné (graphique ci-dessous), notamment dans les domaines du pôle physique.



État des réponses au champ 87

L'analyse des occurrences des mots donne les résultats suivants :

- 32 étude(s)
- 10 projet(s)
- 9 transport(s), reseau, simulation(s)
- 8 analyse(s), impact(s), region, application(s)
- 7 france
- 6 parisienne, pollution(s), milieu, nantes, agglomeration, quartier(s)
- 5 service(s), evaluation, comparaison, trafic, gare, place, aménagement(s), cadre
- 4 emissions, technique(s), terme(s), effet(s), espace(s), strasbourg, lyon
- 3 grande, francaises, systeme, evolution, spatiales, secteur, tissus, zones, consequences, offre, plan, distribution, reseaux, aide, facade(s), dynamique(s), routier(s), circulation, modification, carte(s), tunnel, realisation, site(s), europeen(s), politique

Comme noté précédemment, on constate que la mise en oeuvre des modèles se fait principalement à des fins d'études et de projets, dans les domaines des transports et des réseaux. La simulation permet l'analyse ou l'étude d'impact. Les zones d'études les mieux représentées dans l'inventaire sont la région parisienne, l'agglomération de Nantes, les villes de Strasbourg et Lyon.

Le contenu des réponses montre que les modèles inventoriés ont été appliqués à un grand nombre de situations réelles. A des fins d'illustration, nous reproduisons dans l'encadré ci-dessous la liste des réponses contenant au moins une référence à une situation réelle : un bâtiment, un quartier, une ville ou une agglomération existantes, une région ... désignés comme tels. D'autres réponses moins explicites peuvent recouvrir des situations réelles ; nous ne les reproduisons pas ici, faute de références précises dans la formulation.

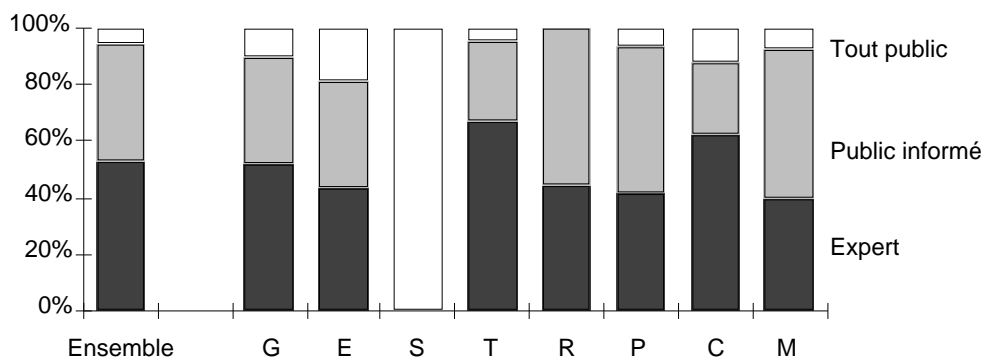
- Application à la politique de stationnement dans le quartier des champs-élysées à Paris - 2
- Agglomération de Bruxelles - 3
- Projets Europeens avec l'IAURIF, le Politecnico de Milan, EBA au Portugal. Le Ministere Japonais de la Construction a utilise AMAP dans le cadre des projets d'aménagements urbains pour la reconstruction de Kobe, etc... - 4
- Accueil d'A16 en Ile-de-France. Contournement de Roissy. Elargissements d'A86. Elargissements de la Francilienne. Site propre sur la RN19 entre Bibliothèque et Ecole Vétérinaire - 5

- Application à des projets urbains en cours de réalisation ou réalisée, dans le cadre du design ou de contentieux juridiques : LISBOA'98 international exhibit (PT) ; place du Marché à Liège (BE) ; lotissement à Bethencourt-sur-mer (FR) ; place Saint-Lambert à Liège (BE).
- Cathédrale Strasbourg - 8
- Ile-de-France, Région Métropolitaine de Montréal et Région Urbaine de Grenoble ; applications prévues en 1999 à Lyon, Lille, Belfort et Sao Paulo - 9
- Calcul de l'écoulement place du Sanitat et square Fleuriot à Nantes, études de maisons japonaises, de la Maison Ronde de Botta - 10
- Etudes d'épisodes de forte pollution sur la région parisienne (AZUR), étude d'aménagement de la circulation d'un quartier (tunnel), étude de pollution locale (ventilation d'un parking), étude d'un rejet accidentel en milieu urbain. - 14, 15
- Simulation pour synthèse des flux sur la place de la gare à Rennes, simulation de flux pour les accès au stade de France (coupe du monde 98), simulation de l'évacuation du stade de France vers la gare RER B - 16
- Collecteur du Fresnes-Choisy (Banlieue parisienne). Réseau intercommunal de la vallée de l'Orne (Meurthe et Moselle). Schéma Directeur d'Arras. Estimation des rejets en Seine et en Marne par temps de pluie (Val de Marne)... - 17
- Etude assainissement Saint-Chamond. Etude assainissement dans le cadre d'un programme européen pour le NANCIE. Etudes de protection contre les inondations ... Nombreuses études à l'étranger... - 18
- Fourniture de résultats de trafic routier pour les horizons futurs dans le cadre d'une étude sur la pollution atmosphérique commandée par le Conseil Régional d'Ile de France. - 19
- Une comparaison a été faite des applications du modèle à Bordeaux, Rouen, Nantes et Strasbourg. Par ailleurs, le modèle a été appliqué pour décrire la dynamique d'une ville américaine. - 22
- Tunnel (RATP), éclairage d'une façade, comparaison de projets d'éclairage d'une rue de Nantes - 23
- Représentation du carrefour de la croix Bonneau à Nantes, représentation de quartiers de la ville de Rennes - 27
- Deux études pour le SYTRAL (autorité organisatrice des transports à Lyon). Une étude sur la région parisienne (GROS QUINQUIN). Une étude pour le Commissariat Général du Plan, de comparaison de modèles pour calibrer le niveau de l'offre en TC dans la région parisienne. - 31
- Tests de scénarios du plan de déplacements urbains de Lyon. - 33
- Etude de trafic concernant la création d'une infrastructure ferroviaire entre Sartrouville et Noisy le Sec (Ile de France). - 38
- Bilan environnemental du transport de marchandises en ville dans l'agglomération de Bordeaux. - 40
- Prévisions des longueurs d'infrastructure et de câblage pour l'accès local, le transport régional, et le transport interurbain, sur la France, comme fonction de l'extension spatiale du réseau et de l'organisation technique retenue ... - 42
- Etude numérique de l'évolution diurne de l'ozone dans la région d'une agglomération (Y. Fraignaud, 1996). Etude des inversions thermiques : application aux écoulements atmosphériques dans les vallées encaissées (C. Guilbaud, 1996). Transports et dispersion de traceurs représentatifs de pollutions sur des sites urbains : prise en compte du relief, le site de Grenoble (L. Machado, 1997).
- Simulation d'un cycle diurne dans la rue de Strasbourg à Nantes. Nombreuses simulations académiques dans des canopées urbaines simplifiées ou en couche de surface sur des patchworks de rugosité. - 44
- Application au calcul de la carte de rugosité de l'agglomération nantaise. - 45
- Etude de trafic - aménagement du boulevard circulaire de la Défense. Etude de circulation dans le Nord Ouest de l'IdF. Etude de trafic sur l'autoroute A4 (péage de Coutevroult). Etude de trafic - évaluation des opérations du 12ième plan ... La liste peut être longue. - 46
- Références utilisateurs : Services Techniques des villes de Colmar, du Havre, de Dax. Compagnie Générale des Eaux, CISE, CFO, DDAF, DDE, Bureaux d'études, Services Techniques départementaux. - 51
- Références Utilisateurs : Services techniques des villes de Nantes, Strasbourg, Colmar, Dax, Laval, Perpignan, Montbéliard. Compagnie Générale des Eaux. DDAF, DDE. Bureaux d'Etudes - 52
- Application au système des villes françaises de 1954 à 1982. - 55
- Le futur réseau européen à grande vitesse. Le projet de TGV Aquitaine. La localisation d'une gare TGV à Poitiers : gare ou gare-bis. Conséquences spatiales en termes de zones de desserte de la modification de la législation sociale sur les chauffeurs routiers. Analyse des projets de réseau à grande vitesse sur la structuration de l'arc atlantique. Analyse du projet de réseau de tramway à Tours. Grille de niveau de service : analyse de la qualité des liaisons interurbaines de transport collectif entre 415 villes françaises à partir de bases de données SNCF et aériennes des services sur un jour semaine de l'hiver 1995. - 56
- Positionnement des sources pour le projet d'illumination de la Place Stanislas (Nancy), de la Grande Mosquée de Kairouan, du Musée de la Ville de Quito. - 58
- Trois exemples de l'agglomération nancéenne ont été testés : Maxéville, quartier de Boudonville et quartier du campus scientifique de Vandoeuvre. - 59
- Evaluation des conséquences sur la demande à court terme et l'évolution à long terme du système de villes françaises, imputées à deux hypothèses de modification de l'offre de transport (réalisation du schéma directeur relatif au réseau TGV, tracé ferroviaire littoral sur la Façade Atlantique). - 62

4.1.2 Niveau d'utilisabilité

• Bilan

Le champ 83 du questionnaire Inventur, de type choix unique, scinde les types d'utilisateurs potentiels de modèles en trois groupes : « tout public », « public informé » et « experts ». Ces groupes définissent ce que nous appelons le niveau d'utilisabilité des modèles. Les résultats par domaines sont présentés dans le graphique ci-dessous.

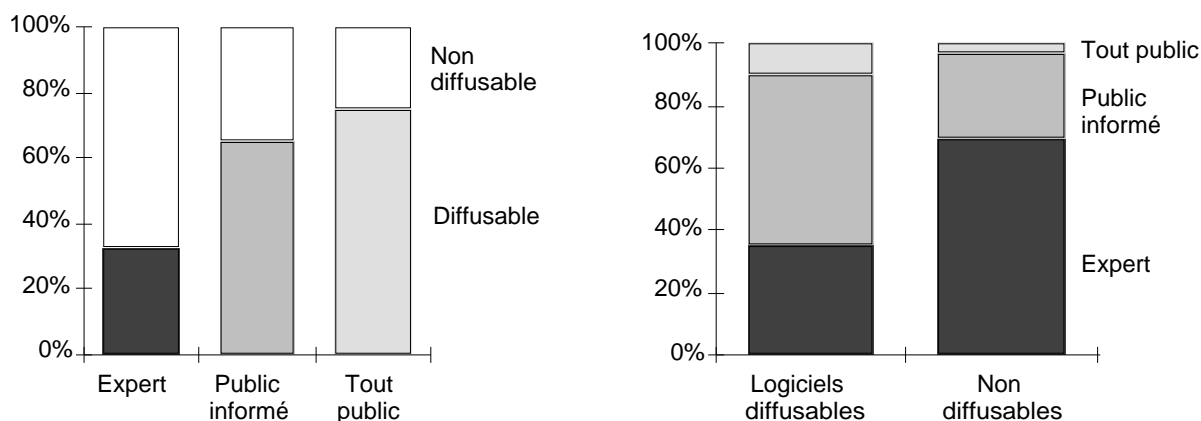


État des réponses au champ 83

Le vocabulaire proposé est assez flou et les catégories sous-jacentes peuvent varier d'un domaine à l'autre. Néanmoins, on constate que plus de la moitié des modèles, tous domaines confondus, ne sont utilisables que par des experts du domaine. Ce fait est encore plus prononcé dans les domaines des transports, des risques ou de la géographie. Dans les autres domaines (économie, réseaux, physique et morphologies), la part des modèles « d'experts » constitue au moins 40 % de l'ensemble. Hors la sociologie (domaine non représentatif), seul le domaine de l'économie présente près de 20 % de modèles dits « tout public ».

• Utilisabilité et diffusabilité

Existe-t-il une relation entre le niveau d'utilisabilité et la diffusabilité du modèle (existence du modèle sous la forme d'un logiciel diffusable) ? Les graphiques ci-dessous montrent une corrélation assez forte entre ces deux caractéristiques : plus le modèle est accessible à un public généraliste, plus il est diffusable ; inversement, parmi les logiciels diffusables, la plus



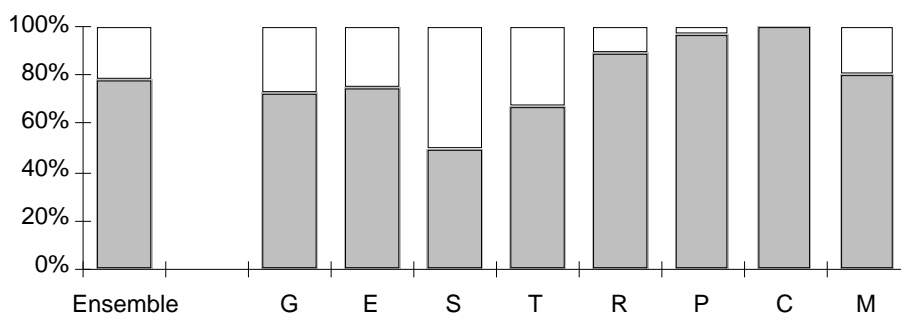
Relation entre utilisabilité et diffusabilité

grande partie s'adresse à un public généraliste (public informé ou tout public). Le rapport est inversé pour les modèles n'existant pas sous la forme de logiciels diffusables : ils s'adressent majoritairement à un public de type expert.

On a noté plus haut que le caractère diffusable ou non d'un modèle dépend, non d'un effet du temps, mais plutôt d'une volonté effective de diffusion, lors de la conception même du modèle. A travers le résultat ci-dessus, on peut supposer que l'accessibilité du modèle à un public le plus large possible, étroitement corrélée à sa diffusion potentielle, fait également l'objet d'une volonté explicite lors de la conception du modèle. D'un autre point de vue, on pourrait également supposer qu'un modèle développé pour être diffusé fait l'objet d'une attention plus grande en matière d'accessibilité ou encore que la diffusion effective du modèle entraîne, par retour des utilisateurs, une amélioration de son accessibilité.

• Temps de formation au modèle

On peut compléter les éléments précédents en s'interrogeant sur le temps de formation nécessaire à la maîtrise du modèle, pour les types d'utilisateurs visés. Ce point fait l'objet du champ 85, de type texte, du questionnaire Inventur. Il est renseigné par près de 80 % des modèles en moyenne, et plus encore dans les domaines du pôle physique (graphique ci-dessous). Quelques-unes des réponses font état d'un temps de formation non connu.



État des réponses au champ 85

L'analyse des réponses permet de classer les temps de formation aux modèles en trois catégories suivantes : la formation en **une journée au plus** (10 modèles), la formation variant **de quelques jours à une semaine** (23 modèles), et la formation de **plusieurs semaines ou mois** (8 modèles). Par ailleurs, trois modèles considèrent que les temps de formation sont **très variables** selon le type d'utilisateurs. L'encadré ci-dessous détaille les réponses obtenues pour chacune de ces catégories.

a) Une journée au plus

- Très faible - 6
- Une journée - 7, 13, 21, 45
- Moins d'une heure - 20
- Moins d'une journée - 34
- Quelques heures - 48
- Une demi-journée - 49, 59

b) De quelques jours à une semaine

- Quelques jours - 3, 24, 25, 26, 33, 44, 58
- Formation de base sur 4 jours ; pratique de quelques mois pour être tout à fait opérationnel - 4
- 3 jours - 5, 47
- De quelques jours à quelques semaines - 11
- 1 semaine - 16, 23, 43
- 2 à 3 jours - 17

- 4 à 5 jours - 18
- De 1/2 journée à 3 jours - 35
- De 1 journée à 3 jours - 37
- De quelques heures à plusieurs jours selon le niveau de formation dans la spécialité - 40
- 1 semaine pour un expert - 42
- 2 Jours - 51, 52
- Une semaine de formation + Expérience personnelle de quelques mois - 61

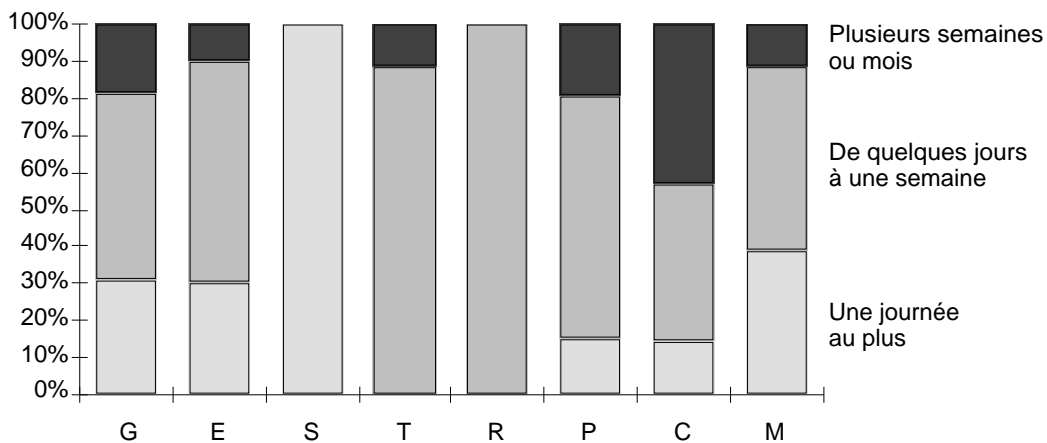
c) Plusieurs semaines ou mois

- 15 jours - 1, 14, 15
- Plusieurs mois - 8
- 1 à 2 mois - 10
- Plusieurs mois - 19
- 1 mois - 54
- Probablement plusieurs semaines, pour quelqu'un déjà au fait de la théorie urbaine. - 64

d) Très variable

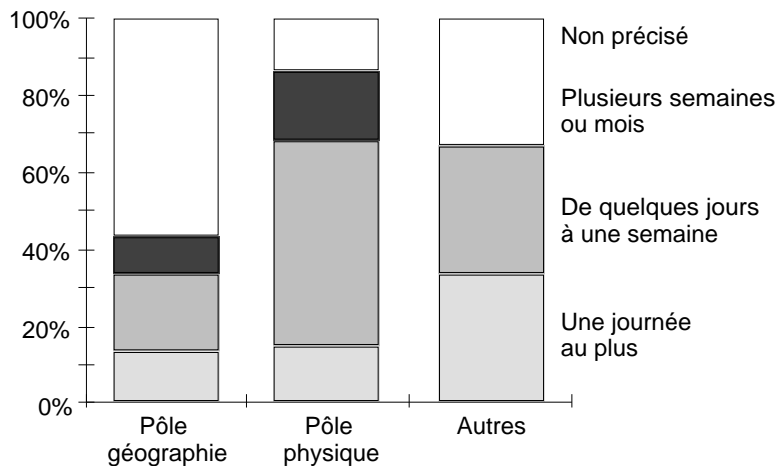
- Cela dépend beaucoup de leurs connaissances préalables (...) - 55
- Tout dépend du niveau d'utilisation considéré, du domaine d'application et des résultats escomptés, de quelques heures à plusieurs semaines. - 56
- Tout dépend des connaissances préalables de l'utilisateur. Entre quelques jours à plusieurs mois. - 63

Si l'on reporte ces données par domaines, on obtient les résultats synthétisés dans le graphique ci-dessous. On observe que le temps de formation, lorsqu'il est connu, est assez inégal suivant les domaines. Ainsi, les domaines des transports et des réseaux techniques ne présentent aucun modèle accessible en moins d'une journée, tandis que cette catégorie représente environ le tiers des modèles des domaines de la géographie, de l'économie et des morphologies. Parallèlement, plus de 40 % des modèles du domaine des risques exigent plusieurs semaines ou plusieurs mois de formation. Cette catégorie est réduite à 10 % dans les domaines de l'économie, des transports et des morphologies.



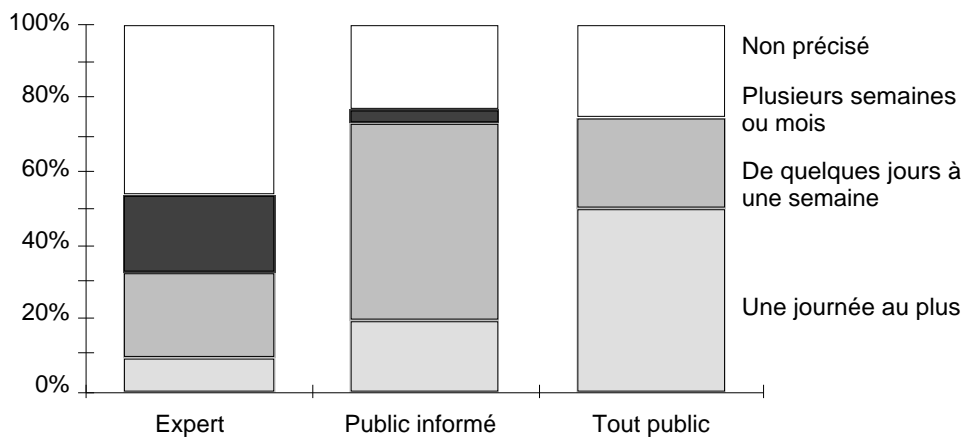
Temps de formation au modèle par domaines

Le décompte par pôles permet d'ajouter aux groupes ci-dessus celui des modèles pour lesquels le temps de formation n'est pas précisé, c'est-à-dire probablement inconnu (graphique page suivante). On note que ceux-ci représentent plus de la moitié des modèles du pôle géographie tandis qu'ils ne sont que 15 % dans le pôle physique. Dans les deux pôles, les modèles accessibles en moins d'une journée représentent un peu plus de 10 % du total. Ceux qui demandent plusieurs semaines ou plusieurs mois de formation sont minoritaires dans les deux pôles, mais cependant plus importants dans le pôle physique. Dans ce dernier, la catégorie des modèles accessibles en moins d'une semaine constitue la majorité.



Temps de formation au modèle par pôles

Enfin, on peut tenter de corrélérer le temps de formation au niveau d'utilisabilité (graphique ci-dessous). Conformément à l'intuition, on observe que plus le modèle est accessible, moins long est le temps moyen de formation. Ainsi, la moitié des modèles réputés « tout public » sont accessibles en moins d'une journée. A l'inverse, près de la moitié des modèles d'experts nécessitent au minimum quelques jours de formation, voire pour près de 20 % de cette catégorie, plusieurs semaines ou plusieurs mois. On remarque également que c'est dans cette dernière catégorie des modèles d'experts que le temps de formation est le moins souvent connu (i.e. le plus souvent non précisé). On suppose qu'il s'agit là d'une conséquence du fait que ces modèles sont également les moins diffusés (cf. ci-dessus).



Temps de formation au modèle par niveaux d'utilisabilité

4.1.3 Conclusion

• Sur l'opérationnalité

La très grande majorité des modèles, tous domaines confondus, sont dits opérationnels par leurs auteurs, si bien que l'on est conduit à penser que l'acception de cette notion est assez lâche dans le champ urbain : derrière ce terme, les modélisateurs veulent-ils seulement faire savoir que leur modèle fonctionne effectivement en tant qu'outil logiciel, ce que ne feraient alors pas les quelques rares modèles dits non opérationnels ?

Pour contourner cette impasse, on peut s'intéresser aux limites effectives des modèles. Certains modèles admettent des limites que l'on peut considérer comme intrinsèques à la modélisation ; elles sont par exemple relatives à des problèmes non encore résolus. D'autres limites résultent du fait que certaines hypothèses ou méthodes de calcul n'ont pas encore été validées ; moins permanentes, elles peuvent être levées à moyen terme. Certains modèles enfin (une majorité parmi ceux qui répondent) mettent en avant des limites opérationnelles résultant de difficultés pratiques dans l'utilisation du modèle. L'existence de ces limites pratiques semble fortement corrélée à la diffusabilité du modèle et au public visé (les chercheurs et les experts du domaine, en majorité).

Prompts à dépasser ces limites, les modélisateurs sont très prolixes lorsqu'on les interroge sur les perspectives envisagées pour améliorer le modèle. La motivation pour la poursuite du travail entamé est très fortement sensible. Outre cette motivation, les résultats laissent également penser que les modélisateurs restent insatisfaits de leurs productions, puisque la grande majorité des modèles appellent des travaux d'extension, de modification, d'optimisation, d'amélioration ou encore de validation et de calibration. Ainsi, il semble que du point de vue du modélisateur, le travail de modélisation est toujours en chantier : un modèle n'est jamais définitif selon ses auteurs. Il semble également que les auteurs sachent précisément dans quelles voies diriger les travaux qui permettent l'amélioration des modèles. Tout laisse donc penser que la veille scientifique en matière de modélisation reste très active (ceci semble naturel venant de laboratoires de recherche), et que les moyens affectés au développement des modèles ne suivent peut-être pas toujours les ambitions des auteurs.

De manière plus optimiste, on notera que même limités et incomplets, les modèles ont fait cependant l'objet de nombreuses applications pratiques dans un grand nombre de situations réelles à des fins d'études et de projets, notamment dans les domaines des transports et des réseaux. L'opérationnalité annoncée est donc au moins en partie confirmée par les faits.

• Sur le niveau d'utilisabilité

Plus de la moitié des modèles inventoriés ne sont utilisables que par des experts du domaine. Ce fait est encore plus prononcé dans les domaines des transports, des risques et de la géographie. Cependant, on remarque que le niveau d'utilisabilité est bien corrélé à la diffusabilité du modèle, si bien que plus les modèles sont diffusables (en moyenne), plus ils s'adressent à un public généraliste. Inversement, les modèles n'existant pas sous la forme de logiciels diffusables s'adressent majoritairement à un public expert. On peut supposer qu'un modèle développé pour être diffusé fait l'objet d'une attention plus grande en matière d'accessibilité, ou encore que la diffusion effective du modèle entraîne, par retour des utilisateurs, une amélioration de son accessibilité.

Par ailleurs, plus le modèle est accessible et moins long est le temps moyen de formation. Ainsi, la moitié des modèles réputés « tout public » sont abordables en moins d'une journée. A l'inverse, près de la moitié des modèles d'experts nécessitent au minimum quelques jours de formation, voire plusieurs semaines ou plusieurs mois. On note également que le temps de formation n'est pas précisé (et supposé inconnu) pour plus de la moitié des modèles du pôle géographie tandis que seuls 15 % des modèles du pôle physique sont dans ce cas.

On retrouve ici une différence de nature importante entre les deux pôles quant à la mise en oeuvre effective des modèles en situation opérationnelle. Les modèles du pôle géographie sont plus souvent des outils de laboratoire utilisés par des experts du domaine à des fins de simulation ; la formation au modèle semble secondaire dans ce processus. Au contraire, les modèles du pôle physique sont plus souvent destinés à un public généraliste, exerçant hors du laboratoire et supposé moins informé des techniques de modélisation ; il importe alors de maîtriser non seulement la diffusion du modèle, mais aussi la formation de ses utilisateurs potentiels. Dans cette situation, la diffusion, la formation ainsi que le niveau d'utilisabilité des modèles forment des critères interdépendants et susceptibles de gager la pertinence opérationnelle des outils proposés à l'utilisation.

4.2 Mise en oeuvre

Nous allons ici tenter de mieux cerner les questions de mise en oeuvre qui conditionnent en partie l'opérationnalité des modèles. Nous examinons les champs relatifs aux matériels et systèmes supports des modèles, aux langages utilisés pour leur développement (et de fait, pour leur adaptation ou leur extension éventuelle face à un problème donné), ainsi que les temps d'exécution des différentes étapes d'utilisation du modèle.

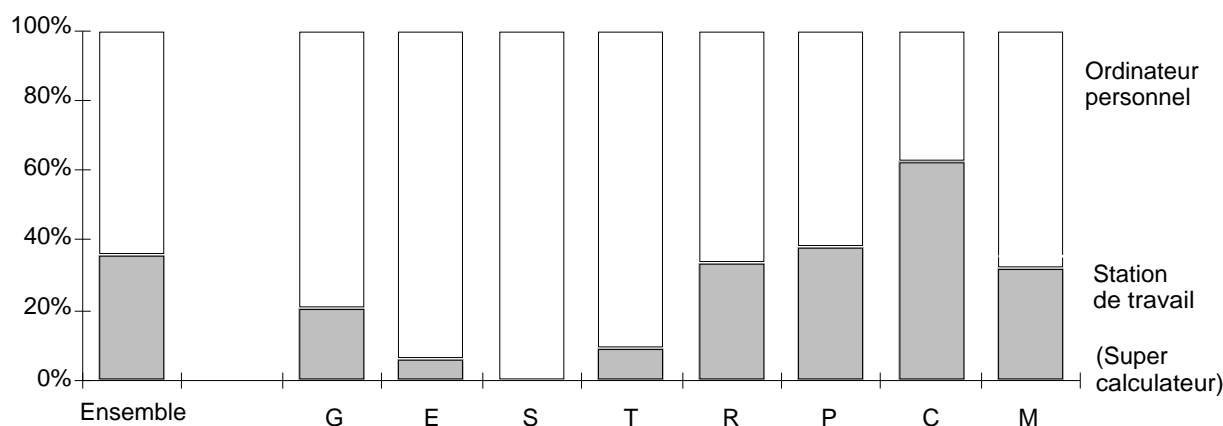
4.2.1 Matériel, système et code

• Matériel minimum requis

Le champ 68 du questionnaire Inventur propose trois catégories de matériel : l'ordinateur personnel, la station de travail et le supercalculateur. La question est de type choix unique ; de ce fait, nous avons insisté sur le caractère minimal du matériel requis, étant entendu qu'un modèle pouvant être exécuté *stricto sensu* sur un ordinateur personnel peut devoir, pour une utilisation efficace, nécessiter une station de travail, voire un super calculateur.

Les réponses sont représentées dans le graphique ci-dessous. On note qu'aucun modèle n'exige au minimum un supercalculateur quoique, en pratique, certains modèles du domaine de la physique aient effectivement recours à ce type de machine pour fonctionner. Dans l'ensemble, la majorité des modèles se satisfont d'un ordinateur personnel. Cela reste cependant moins vrai dans les domaines du pôle physique et de la morphologie. Dans les domaines de l'économie et des transports, la très grande majorité des modèles peuvent être mis en oeuvre sur un ordinateur personnel.

On remarque que le domaine des risques présente une majorité de modèles installés sur des stations de travail. On peut rapprocher ce résultat du fait que ce domaine présente la plus forte proportion de modèles existant sous la forme de logiciels diffusables (cf. § 3.3.2). Ainsi, la diffusabilité d'un modèle ne semble pas liée, au contraire, à sa mise en oeuvre sur un matériel léger.



État des réponses au champ 68

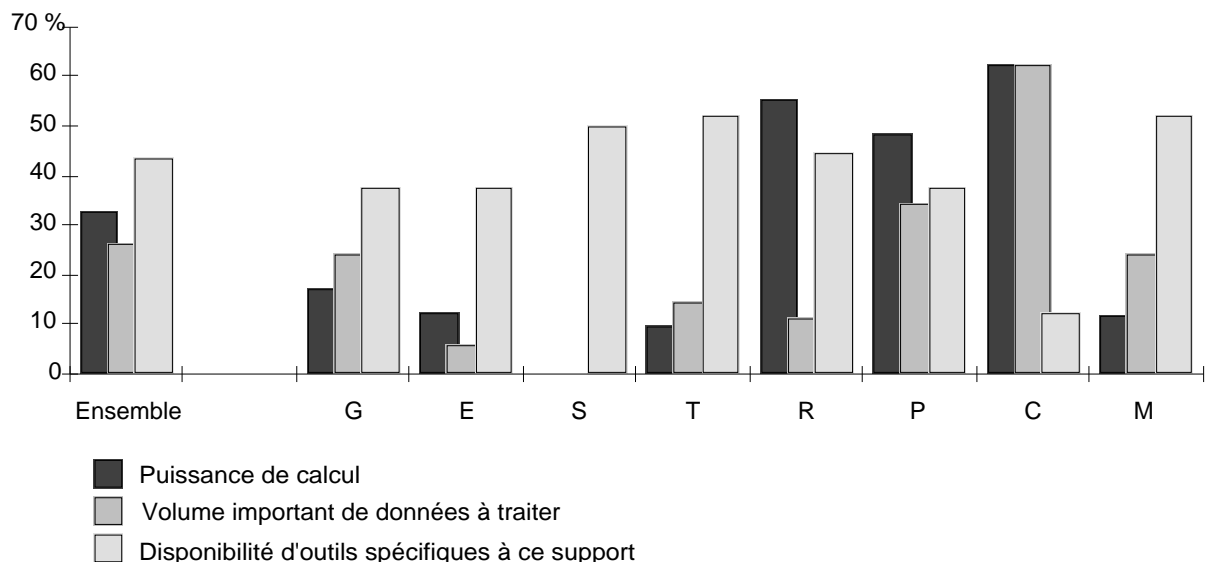
• Autres matériels nécessaires, notamment en matière d'acquisition des données

L'analyse des réponses à la question 69 permet de constituer la liste ci-dessous (la valeur entre parenthèses donne le nombre d'occurrences des matériels cités pour l'ensemble des modèles). On remarque qu'il s'agit essentiellement de matériels relativement légers et, en général, facilement accessibles.

- Table à digitaliser / tablette graphique (5)
- Scanner (3)
- Stations Silicon Graphics (cartes graphiques spécifiques) (2)
- Réseau de télémesure et télécommande (1)
- Caméra vidéo équipée de capteurs angulaires (1)

• Motivations du choix matériel

Le champ 70 du questionnaire propose trois options (choix multiple) pour expliquer le choix du matériel utilisé : la puissance de calcul, le volume important de données à traiter, et / ou la disponibilité d'outils spécifiques à ce support. Les résultats sont représentés dans le graphique ci-dessous. Dans l'ensemble, les trois motivations proposées sont représentées de manière équilibrée, avec un avantage pour la disponibilité d'outils spécifiques et un désavantage pour le volume de données.



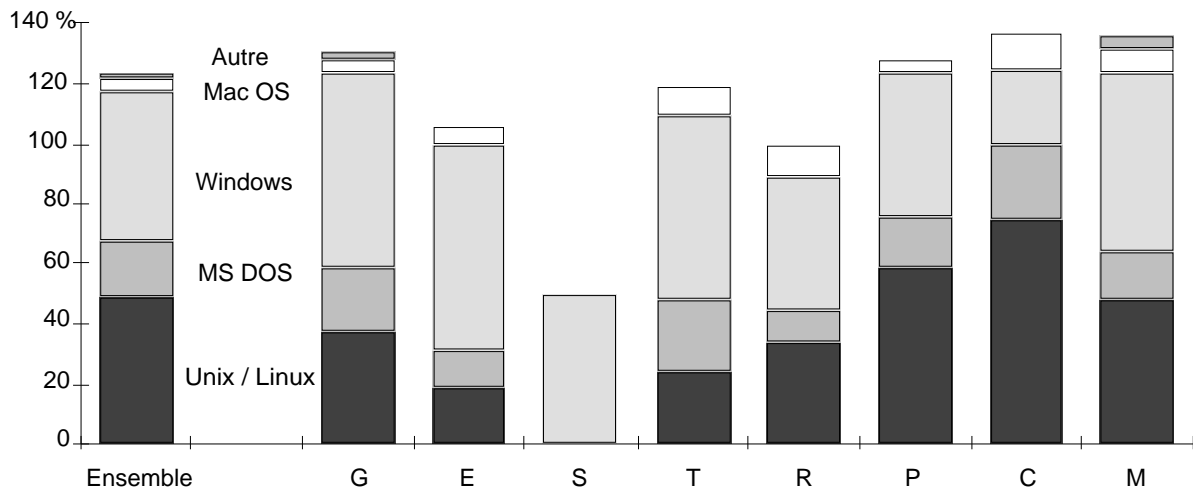
État des réponses au champ 70

La répartition est très variée suivant les domaines. La puissance de calcul est la motivation principale des domaines du pôle physique et la dernière motivation des autres domaines. Le volume des données à traiter semble être un paramètre prédominant dans le domaine des risques. Il est également important dans les domaines de la physique, de la géographie et de la morphologie. Cependant, pour la majorité des domaines sauf la physique et les réseaux, c'est la disponibilité d'outils spécifiques qui détermine le choix matériel. On pense en particulier à l'existence, sur le support, d'outils de développement ou de calcul, de systèmes ou de bibliothèques spécialisées, voire d'autres modèles.

Si l'on analyse le détail du choix des options, on remarque qu'une seule motivation est généralement choisie. Cependant, 7 modèles nécessitent à la fois puissance de calcul et traitement d'un grand volume de données : ce sont des modèles de pollution atmosphérique (ID 14, 15, 43, 44), d'imagerie de synthèse (D 1, 28) ou d'hydrologie (63). Par ailleurs, 5 modèles invoquent les trois besoins en même temps.

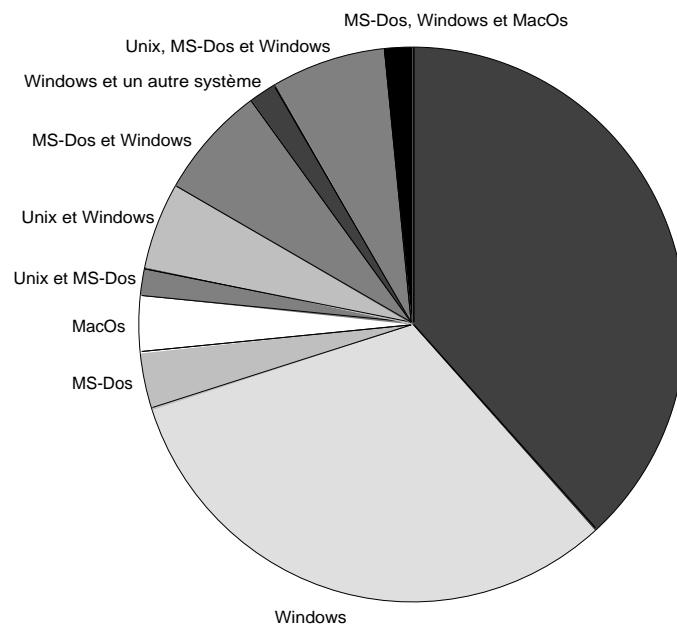
• Système support

Le ou les systèmes sous lesquels le modèle est utilisable font l'objet du champ 72 du questionnaire. Les résultats sont synthétisés dans le graphique ci-dessous. Les systèmes de type Unix et MS-Windows sont prédominants, avec une prépondérance des systèmes Unix dans le pôle physique et une primauté de Windows dans le pôle géographie, notamment en économie et dans les transports. Ces résultats sont naturellement corrélés aux précédents concernant le matériel utilisé. On note également que le système MS-DOS continue d'être utilisé tandis que les systèmes Mac OS ou autres apparaissent très marginaux.



État des réponses au champ 72

Si l'on analyse le détail des options (graphique ci-dessous), on constate que le système Unix seul reste le support principal d'utilisation (et de développement) des modèles, suivi de près par les systèmes de type Windows. Certains modèles fonctionnent sous plusieurs systèmes



État des réponses au champ 72 : détail des options

et, notamment, 4 d'entre eux ont été développés à la fois sous Unix, MS DOS et Windows.

• **Autres ressources systèmes nécessaires**

On répertorie les réponses suivantes au champ 73 du questionnaire, de type texte (entre parenthèses, le nombre d'occurrences analogues) :

- Une version spécifique du système Windows (3)
- Tableur de type Excel (3)
- Affichage graphique performant (1)
- MAP INFO + MAP BASIC + HYPERCARD (1)
- Bibliothèque graphique GKS sur station de travail SUN (1)
- Bibliothèques Xmotif et Open Inventor (1)

Outre le support offert par le système choisi, les moyens logiciels engagés pour l'utilisation et le développement des modèles ne semblent pas très importants.

• **Bibliothèques extérieures auxquelles le modèle fait appel**

Pour compléter les résultats précédents, on peut également demander quelles bibliothèques extérieures au développement le modèle utilise. Cette question fait l'objet du champ 76, de type texte, du questionnaire Inventur. On note les réponses suivantes :

- Des bibliothèques graphiques pour l'affichage et l'interface (Open GL, OpenInventor, UIM/X, View Kit, GKS, Xmotif, Ilog Views, Digital Media, Video lib, bibliothèques graphiques de Matlab)
- Quelques bibliothèques extérieures pour la saisie graphique (saisie graphique de bitmaps écran) ou pour les maillages (triangulation)
- Un programme d'intégration (Merton).
- Les bibliothèques de calcul du langage de développement (FORTRAN)

On note que les modélisateurs délèguent peu de fonction de leur modèle à des bibliothèques extérieures, sauf en ce qui concerne l'affichage graphique ou l'interface homme-machine. Doit-on en conclure que les développements réalisés sont trop spécifiques pour être délégués à des routines standards ? Que les routines dédiées n'existent pas ? Ou qu'elles sont inconnues des modélisateurs ? Ces questions devraient mériter un approfondissement afin de constater, en pratique, quelles briques logicielles peuvent être partagées entre les différents modèles.

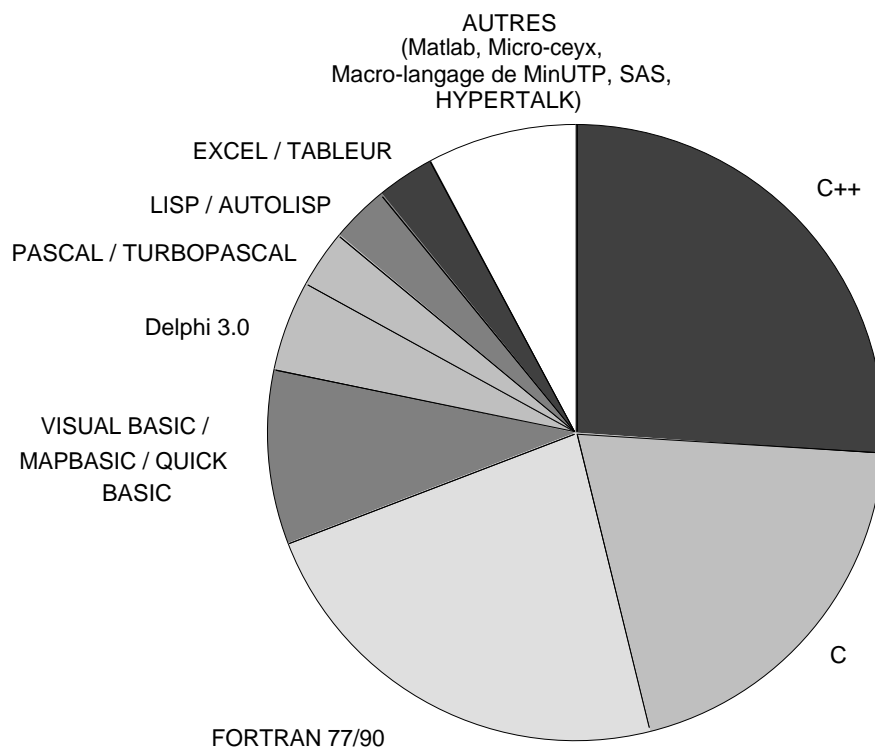
• **Code dans lequel le modèle est principalement écrit**

Les réponses à ce champ de type texte (n° 74) mettent en avant les langages classiques (C et C++, Fortran 77 et 90, Basic) et quelques autres plus spécifiques. Un comptage des réponses permet d'établir le graphique page suivante en haut.

Près de la moitié des modèles sont développés en C ou en C++ avec, dans cette catégorie, une petite majorité de modèles en C++. Le Fortran est également à l'honneur, avec près du quart des modèles (le plus souvent dans le pôle physique). Les autres langages cités ont une portée plus restreinte ; on note cependant que le langage Basic est utilisé, sous différentes formes, de manière non négligeable.

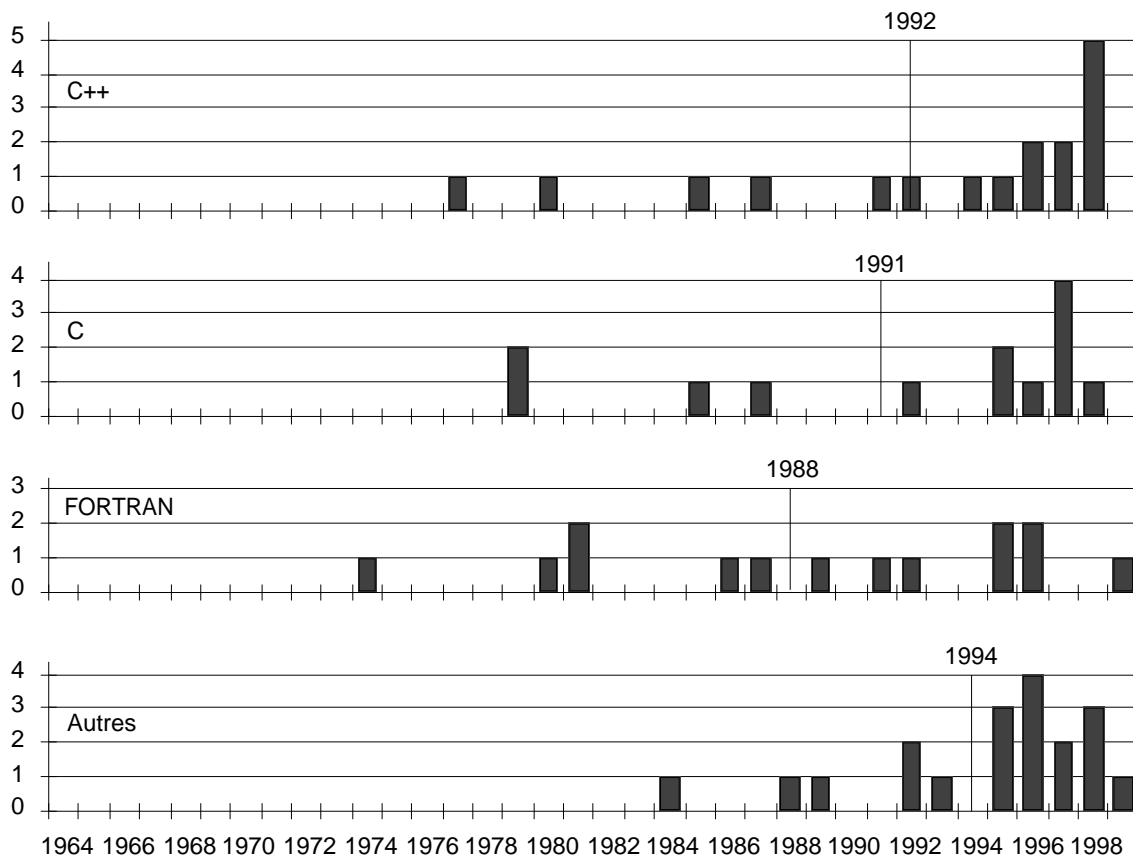
Si l'on examine la répartition des modèles par années en fonction du langage de développement (graphiques page suivante en bas), on constate que le C++ (moyenne en 1992) et les autres langages spécifiques (moyenne en 1994) accompagnent fortement la croissance du développement de modèles ces dernières années. Le langage C s'inscrit dans la moyenne (1991) tandis que le Fortran semble marquer un certain recul (moyenne en 1988, peu d'évolution ces dernières années). Ces résultats laissent penser que le C++ tendrait à

devenir le langage de référence de la modélisation, tandis qu'émergeraient parallèlement un certain nombre de langages très spécifiques, sans doute dédiés à différentes classes de problèmes de modélisation dans le champ urbain.

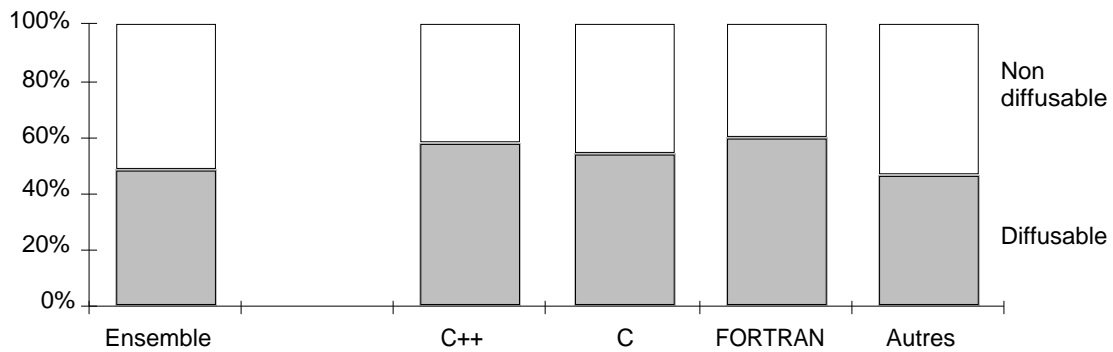


Bilan des réponses au champ 74

On peut également tenter d'observer les relations entre le langage de développement et l'existence du modèle sous forme d'un logiciel diffusable. Les résultats sont consignés dans le graphique ci-dessous. De manière assez surprenante, les modèles écrits dans les langages les plus classiques (Fortran et C) existent plus souvent sous la forme de logiciels diffusables, tandis que ceux écrits dans les langages spécifiques sont conformes à la moyenne. Ce résultat est peut-être lié à l'âge des modèles développés dans ces langages (ils seraient en moyenne plus vieux, notamment pour ceux écrits en Fortran). Cependant, les différences observées entre les langages apparaissent peu significatives.



Relation en le langage de développement et l'année de création



Relation entre langage de développement et diffusabilité du modèle

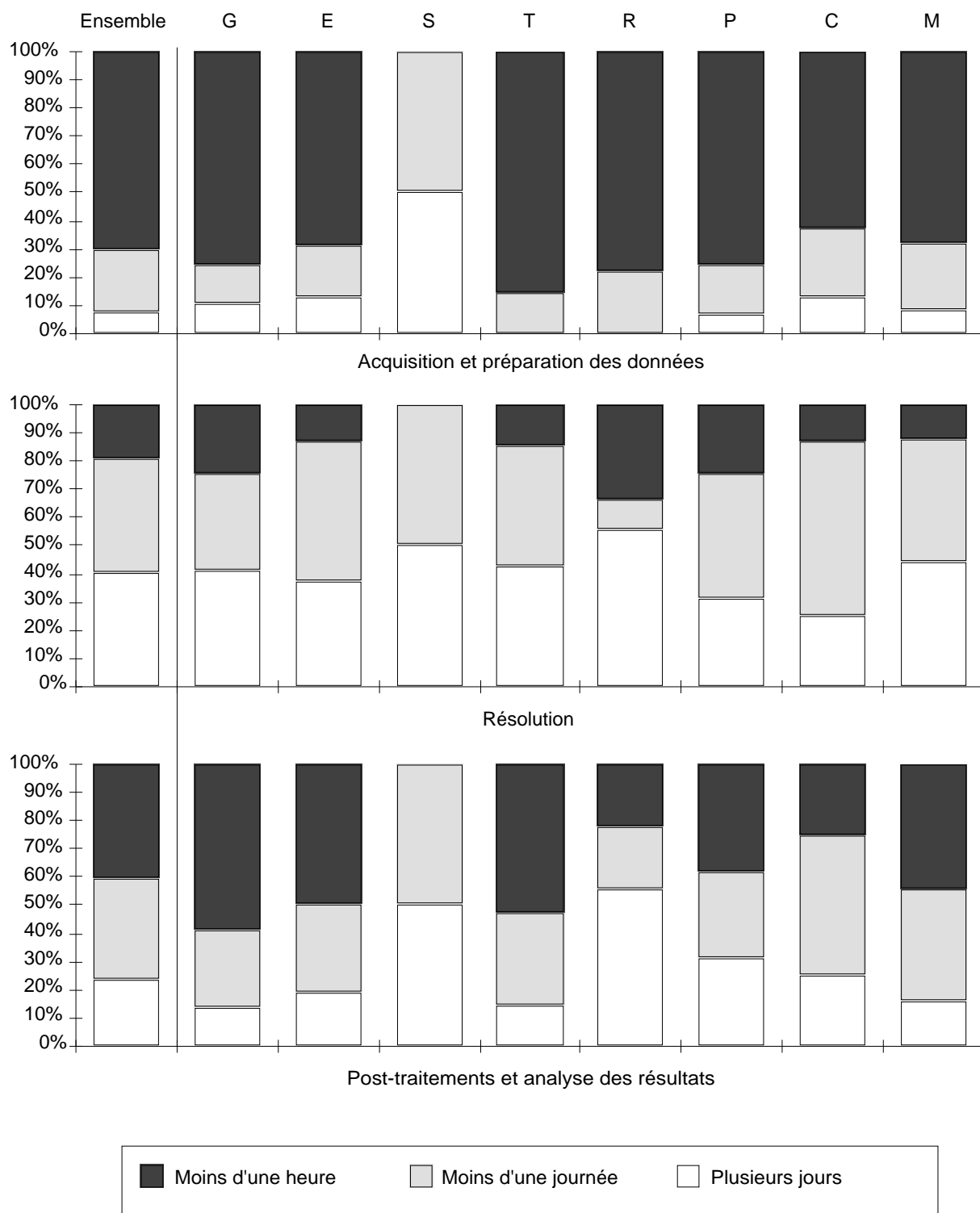
4.2.2 Temps de mise en oeuvre

• Bilan général

L'opérationnalité d'un modèle peut en partie se juger à sa facilité de mise en oeuvre et, en particulier, au temps nécessaire pour produire les résultats attendus. Les champs 78, 79 et 80 du questionnaire Inventur proposent de caractériser le temps nécessaire pour les trois grandes étapes de mise en oeuvre d'un modèle : 1) l'acquisition et la préparation des données, 2) la résolution, et 3) les post-traitements et l'analyse des résultats. Pour chaque étape, on propose un choix unique parmi les options suivantes : moins d'une heure, moins d'une journée (i.e. quelques heures) et plusieurs jours.

Les graphiques page suivante synthétisent par domaine et mettent en parallèle les résultats pour les trois questions. Tous domaines confondus (première colonne), on constate que la phase d'acquisition et de préparation des données est la plus lourde, mobilisant plusieurs jours pour 70 % des modèles, et au moins plusieurs heures pour 90 % d'entre eux. Au contraire, l'étape de résolution apparaît très rapide : moins d'une heure pour 40 % des modèles et moins d'une journée pour 80 % d'entre eux. L'étape de post-traitements et d'analyse des résultats semble quant à elle plus variable : quelques heures au plus pour une petite majorité de modèles (60 %), plusieurs jours pour les autres.

Ces tendances sont constantes dans les domaines. La phase d'acquisition et de préparation des données prend rarement moins d'une heure, et jamais dans les domaines des transports et des réseaux techniques. La résolution est toujours très rapide, le temps de calcul étant légèrement plus long, en moyenne, dans les domaines de la physique et des risques (dans ces domaines, moins de 30 % des modèles produisent des résultats en moins d'une heure). On note que le domaine des réseaux techniques est très partagé entre des modèles à résolution rapide (moins d'une heure pour plus de 50 %) et d'autres à résolution très lente (plusieurs jours pour près du tiers des modèles). On peut supposer que ce résultat reflète la différence entre des modèles de contrôle en « temps réel » et des modèles de simulation plus lourds.



État des réponses aux champs 78, 79 et 80

La phase de post-traitements et d'analyse des résultats est celle qui présente le plus de variations entre les domaines. Elle semble très rapide pour plus de la moitié des modèles du domaine des réseaux techniques (moins d'une heure, cf. remarque précédente) et au contraire plutôt longue pour la même proportion des modèles en géographie (plusieurs jours). Globalement, les résultats des modèles du pôle géographique demandent une interprétation longue (sans doute parce que plus délicate), tandis que ceux du pôle physique seraient, toutes proportions gardées, plus faciles à interpréter.

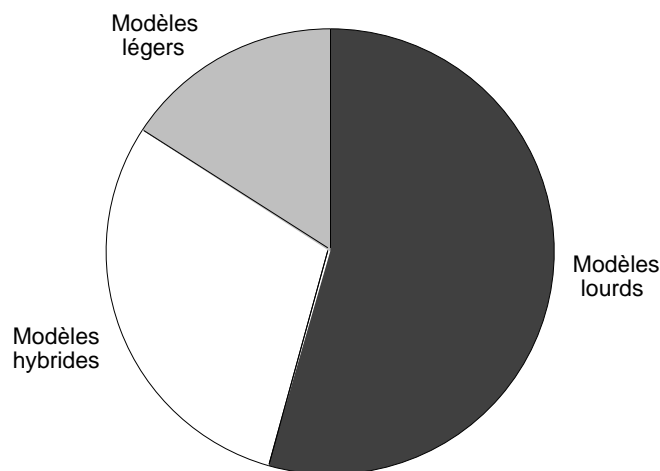
• Typologie des profils, lourdeur des modèles

Les données précédentes permettent d'établir des profils caractéristiques de « lourdeur » des modèles. Un profil est donné par les temps de mise en oeuvre pour chaque étape en suivant le code : 1 si l'étape s'effectue en moins d'une heure, 2 en moins d'une journée et 3 en plusieurs jours. Ainsi, un modèle de profil 312 demande plusieurs jours pour l'acquisition et la préparation des données (étape 1, valeur 3), moins d'une heure pour la résolution (étape 2, valeur 1), et moins d'une journée pour l'interprétation des résultats (étape 3, valeur 2).

A partir de cette grille, nous pouvons dégager trois catégories de modèles :

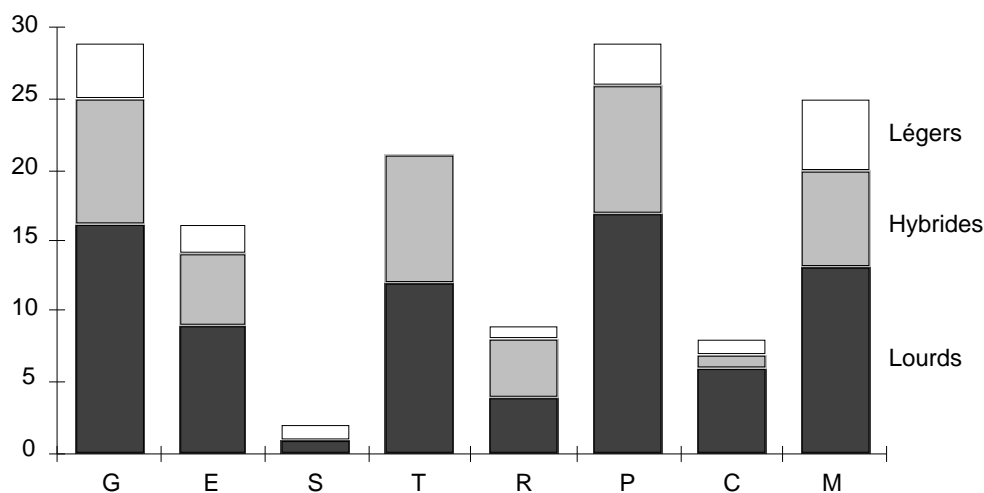
- a) **Les modèles « lourds »** qui rassemblent les profils de type 333, 332, 323, 322, 233 et 222. Plusieurs jours sont nécessaires pour la préparation des données (plusieurs heures dans le meilleur des cas) ; la résolution demande plusieurs heures ou plusieurs jours ; l'interprétation se fait en plusieurs jours ou, plus rarement, en plusieurs heures ; dans le meilleur des cas, chaque phase de mise en oeuvre du modèle demande plusieurs heures. Cette catégorie rassemble 35 modèles sur 64 (ID 4, 9, 10, 17, 18, 19, 54, 55, 56, 1, 2, 3, 7, 8, 30, 32, 46, 58, 61, 64, 39, 63, 57, 12, 23, 28, 43, 45, 5, 14, 15, 27, 42, 44, 60).
- b) **Les modèles « légers »** (par opposition aux précédents) qui rassemblent les profils de type 111, 112, 211 et 212. Les données se préparent en moins d'une heure, quelques heures dans certains cas. La résolution est rapide (moins d'une heure). Les résultats peuvent être interprétés en moins d'une heure en général, quelques heures au pire. Aucune des phases ne demande plusieurs jours si bien que la mise en oeuvre complète du modèle peut être envisagée en moins d'une journée (10 modèles sur 64 : ID 20, 25, 49, 6, 26, 13, 53, 34, 41, 59).
- c) **Les modèles « hybrides »** qui rassemblent les profils de type 311, 313, 312, 321, 221. Leur mise en oeuvre alterne des phases rapides et des phases lourdes. Par exemple, la préparation des données peut exiger plusieurs jours, pour une résolution et une interprétation rapide des résultats. Dans d'autres cas, les résultats produits très rapidement demandent une interprétation longue. Cette catégorie rassemble 19 modèles sur 64 (ID 24, 29, 35, 36, 48, 51, 52, 22, 31, 33, 38, 40, 16, 21, 50, 62, 11, 37, 47).

Le graphique ci-dessous illustre la part relative de chacune des catégories dans l'inventaire. On note que les modèles lourds forment plus de la moitié des modèles recensés. Les modèles légers constituent une minorité de 15 % environ.



Typologie des modèles suivant les temps de mise en oeuvre des différentes étapes

Les modèles lourds se répartissent dans tous les domaines, dans une proportion qui dépasse le plus souvent la moitié (graphique ci-dessous). Le domaine des risques présente cependant une très forte proportion de ce type de modèles. Les modèles légers sont distribués dans tous les domaines, à l'exception notable du domaine des transports. Il sont relativement plus présents dans le domaine de la morphologie urbaine.



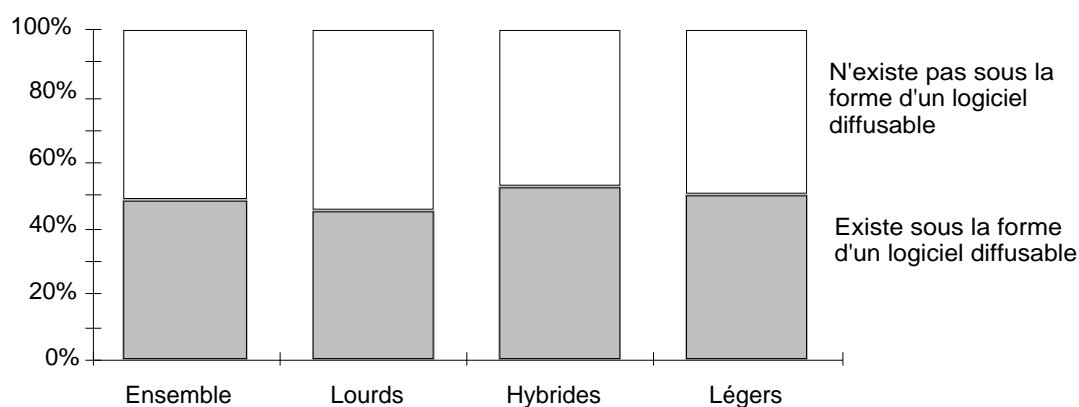
Lourdeur par domaines (en nombre de modèles)

• **Lourdeur et âge des modèles**

Il n'existe aucune relation entre la lourdeur et l'âge du modèle puisque l'année moyenne de création des modèles par catégories est 1991 pour les modèles lourds et les modèles hybrides (conformes à la moyenne de l'ensemble), et 1992 pour les modèles légers.

• **Lourdeur et diffusabilité**

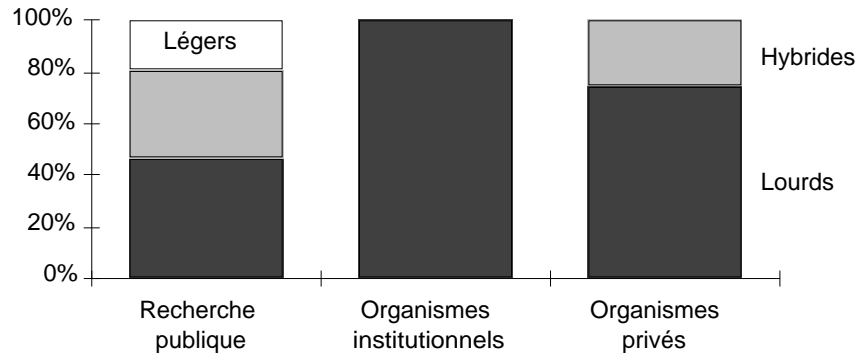
La lourdeur est-elle un handicap pour ce la diffusabilité du modèle ? Les résultats semblent montrer le contraire (graphique ci-dessous) : les trois classes présentent des proportions équivalentes de modèles existants ou non sous forme de logiciels diffusables. Contrairement à ce qu'on peut imaginer, la lourdeur ne semble donc pas pénalisante pour la diffusion du modèle. Il ne semble pas exister de corrélation entre ces deux facteurs.



Lourdeur et diffusabilité

• **Lourdeur et origine**

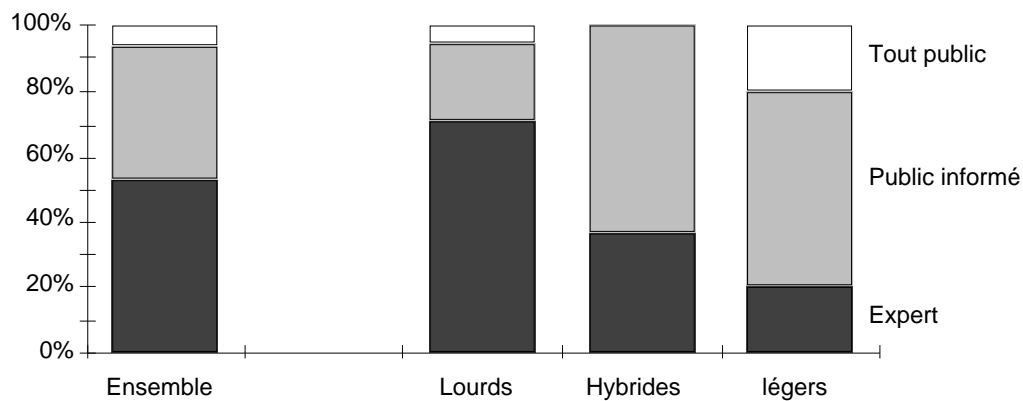
Les organismes institutionnels produisent exclusivement des modèles lourds, de même que la majorité des organismes privés (graphique ci-dessous). Les modèles légers sont tous produits par les laboratoires de recherche publique.



Lourdeur et origine

• **Lourdeur et niveau d'utilisabilité**

La relation entre la lourdeur du modèle et son utilisabilité est sans ambiguïté (graphique ci-dessous) : plus le modèle est lourd, plus il s'adresse à un public de type expert. Le temps de formation au modèle étant corrélé au niveau d'utilisabilité (cf. § 4.1.3), on peut également supposer que plus lourd est le modèle, plus longue est la formation nécessaire pour l'utiliser.



Lourdeur et niveau d'utilisabilité

4.2.3 Conclusion

• **Sur le matériel et les systèmes**

En matière de matériel, la majorité des modèles se satisfont d'un ordinateur personnel. Cela reste cependant moins vrai dans les domaines du pôle physique et de la morphologie. Aucun modèle n'exige au minimum un supercalculateur quoique, en pratique, certains modèles du domaine de la physique aient effectivement recours à ce type de machine pour fonctionner.

Les modèles sont principalement développés sur des systèmes de type Unix et Windows. Conformément aux préférences en matière de matériel, on note qu'Unix est prédominant dans le pôle physique tandis que Windows apparaît au contraire plus présent dans le pôle géographie, notamment dans les domaines de l'économie et des transports. On peut rapprocher ces résultats de l'âge moyen des modèles dans les deux pôles ainsi que de la forte progression récente des modèles dans le pôle géographie (depuis 1995), que nous avons reliée par ailleurs au développement rapide des ordinateurs personnels dans la même période.

Par ailleurs, on note que les modèles sont le plus souvent développés sur un système unique. Cependant, certains parmi les modèles inventoriés fonctionnent sous plusieurs systèmes et notamment quelques-uns d'entre eux ont été développés à la fois sous Unix, MS-DOS et Windows.

Dans le choix du matériel, la puissance de calcul est la motivation principale des domaines du pôle physique et la dernière motivation des autres domaines. Le volume des données à traiter semble être un paramètre prédominant dans le domaine des risques. Il est également important dans les domaines de la physique, de la géographie et de la morphologie.

Cependant, pour la majorité des domaines sauf la physique et les réseaux techniques, c'est la disponibilité d'outils spécifiques qui détermine le choix matériel. On pense en particulier à l'existence, sur le support, d'outils de développement, de systèmes ou de bibliothèques spécialisées, voire d'autres modèles interfacés avec les modèles décrits.

Peu d'autres matériels sont nécessaires à la mise en oeuvre des modèles et, le cas échéant, il s'agit essentiellement de matériels légers et faciles d'accès (table à digitaliser, scanner, etc.). Par ailleurs, outre le support offert par le système choisi, les moyens logiciels engagés pour l'utilisation et le développement des modèles ne semblent en général pas très importants. On note également que les modélisateurs délèguent peu de fonctions de leur modèle à des bibliothèques extérieures, sauf en ce qui concerne l'affichage graphique ou l'interface homme-machine. Doit-on en conclure que les développements réalisés sont trop spécifiques pour être délégués à des routines standards, que les routines *ad hoc* n'existent pas, ou encore qu'elles sont inconnues des modélisateurs ?

Pourtant, il est probable que des éléments logiciels de la modélisation sont susceptibles d'être standardisés et partagés puisque près de la moitié des modèles sont développés en C ou en C++ avec, dans cette catégorie, une petite majorité de modèles en C++. Le Fortran est également bien représenté, avec près du quart des modèles (le plus souvent dans le pôle physique). Les autres langages cités ont une portée plus restreinte ; on note cependant que le langage Basic est utilisé, sous différentes formes, de manière non négligeable.

Cependant, on note que le C++ et quelques autres langages plus spécifiques accompagnent fortement la croissance du développement de modèles ces dernières années tandis que le Fortran semble marquer un certain recul. Le C++ tendrait ainsi à devenir le langage de référence de la modélisation, tandis qu'émergeraient parallèlement un certain nombre de langages très spécifiques, sans doute dédiés à différentes classes de problèmes particuliers de la modélisation dans le champ urbain.

• Sur le temps de mise en oeuvre

La mise en oeuvre des modèles en situation opérationnelle peut être scindée en trois phases qui concernent successivement : l'acquisition et la préparation des données, la résolution proprement dite, les post-traitements et l'analyse des résultats. Tous domaines confondus, la phase d'acquisition et de préparation des données est la plus lourde, mobilisant plusieurs jours pour la grande majorité des modèles, et au moins plusieurs heures pour 90 % d'entre eux. Cette phase demande rarement moins d'une heure, et jamais dans les domaines des transports et des réseaux techniques par exemple.

Au contraire, l'étape de résolution apparaît généralement très rapide : moins d'une heure pour 40 % des modèles et moins d'une journée pour 80 % d'entre eux. Cependant, le temps de calcul apparaît légèrement plus long, en moyenne, dans les domaines de la physique et des risques. Le domaine des réseaux techniques est quant à lui bien partagé entre des modèles à résolution rapide (moins d'une heure) et d'autres à résolution très lente (plusieurs jours). On peut supposer que ce résultat reflète la différence entre des modèles de contrôle de type « temps réel » et des modèles de simulation plus exigeants.

L'étape de post-traitements et d'analyse des résultats est la plus variable : elle apparaît très rapide pour plus de la moitié des modèles du domaine des réseaux techniques (moins d'une heure, cf. remarque précédente) et au contraire plutôt longue pour la même proportion des modèles en géographie (plusieurs jours). Globalement, les modèles du pôle géographie demandent une interprétation longue (sans doute parce que délicate) tandis que ceux du pôle physique seraient, toutes proportions gardées, plus faciles à interpréter.

Nous avons extrapolé ces résultats pour constituer trois catégories de modèles : les modèles « lourds » dont la mise en oeuvre demande plusieurs heures, dans le meilleur des cas, pour chacune des trois phases (plusieurs jours le plus souvent) ; l'utilisation de ces modèles est un travail de longue haleine ; les modèles « légers » pour lesquels aucune phase d'application ne demande plusieurs jours, si bien que la mise en oeuvre complète du modèle peut être envisagée en moins d'une journée ; les modèles « hybrides » dont la mise en oeuvre alterne des phases rapides et des phases lourdes (par exemple, la préparation des données peut exiger plusieurs jours, pour une résolution et une interprétation rapide des résultats ; dans d'autres cas, les résultats produits très rapidement demandent une interprétation longue).

Les modèles lourds forment plus de la moitié des modèles recensés et ils se répartissent dans la même proportion au sein de chaque domaine. Les modèles légers constituent une minorité dans tous les domaines, à l'exception notable du domaine des transports. On remarque que les organismes institutionnels produisent exclusivement des modèles lourds, de même que la majorité des organismes privés. Les modèles légers sont tous produits par les laboratoires de recherche publique.

On note qu'il n'existe aucune relation entre la lourdeur et l'âge du modèle, autrement dit les modèles ne semblent ni « s'alourdir » ni « s'alléger » avec le temps. De plus, la lourdeur n'est pas un handicap pour ce qui concerne la diffusabilité du modèle ; il ne semble pas exister de corrélation entre ces deux facteurs. Par contre, plus un modèle est lourd, plus il s'adresse à un public de type « expert ». Le temps de formation au modèle étant corrélé au niveau d'utilisabilité, on peut supposer que plus lourd est le modèle, plus long est également le temps de formation nécessaire pour le manipuler.

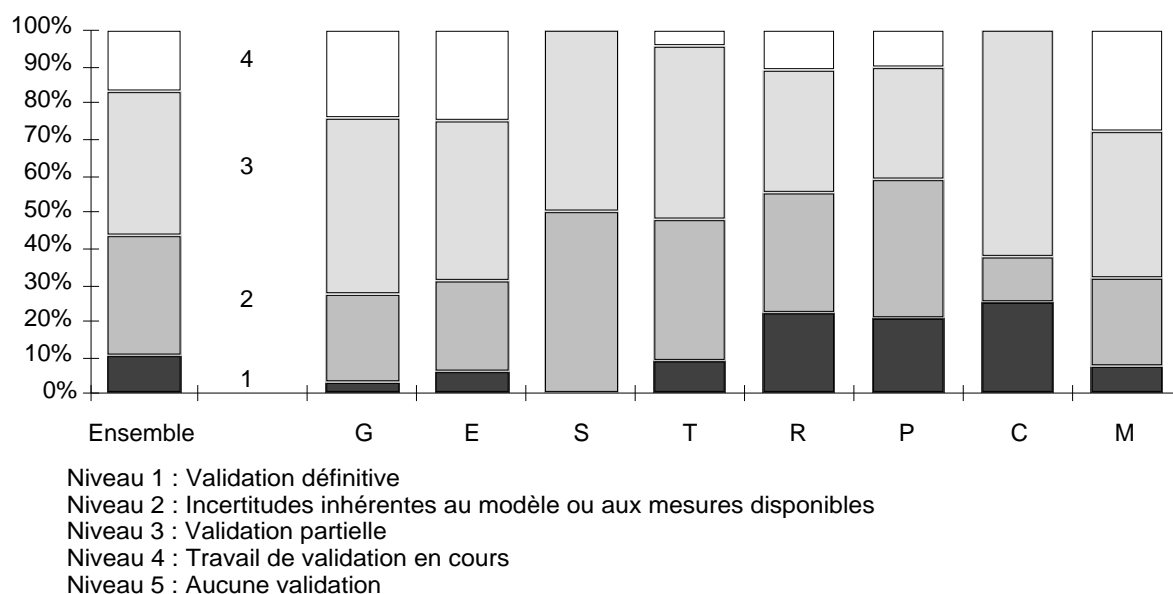
4.3 Validation et documentation

4.3.1 Niveau de validation du modèle

• Bilan général

Le niveau de validation est à l'évidence un élément essentiel pour estimer l'opérationnalité d'un modèle. On peut supposer que meilleure est la validation du modèle, plus fiable est celui-ci et plus l'usage que l'on en fait peut être efficace. La validation est donc corrélée au degré de confiance que l'on peut accorder aux modèles.

Le champ 55 du questionnaire, de type choix unique, propose 5 niveaux de validation: 1) validation définitive, 2) incertitudes inhérentes au modèle ou aux mesures disponibles, 3) validation partielle (sur un ou plusieurs cas particuliers, par exemple), 4) validation en cours et 5) aucune validation. Le graphique ci-dessous représente les résultats par domaines.

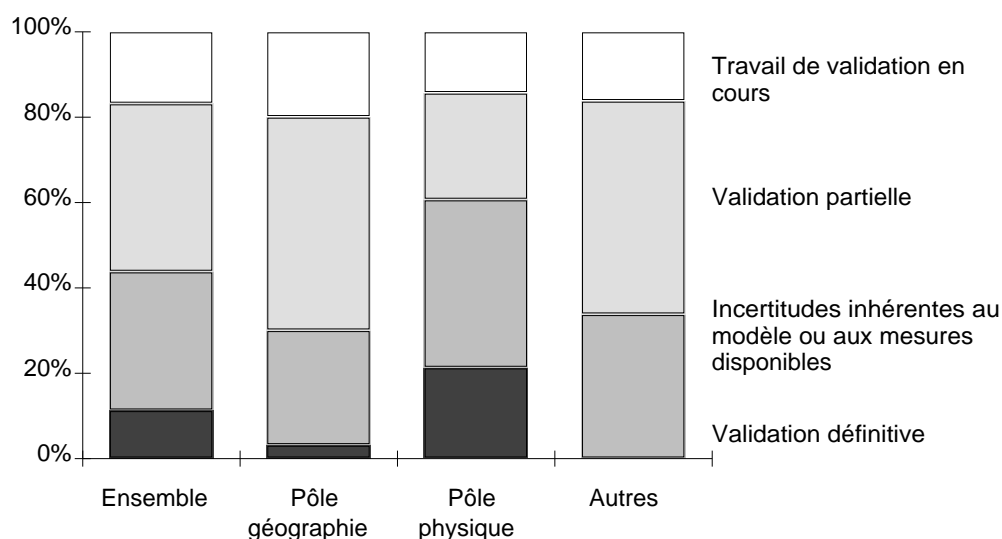


Niveau de validation des modèles : du niveau 1 (en bas, noir) au niveau 4 (en haut, blanc) suivant les domaines.

L'ensemble des modèles présente un niveau de validation moyen assez élevé puisque plus de 40 % des modèles atteignent le niveau 2, tandis qu'une minorité de modèles ont seulement entamé le travail de validation. Aucun modèle n'est classé au niveau 5 : s'agit-il d'une simple pudeur qui ferait qu'un modèle non validé serait classé plus facilement au niveau 4 ?

Cependant, pour tous les domaines sauf les réseaux techniques et la physique, c'est le niveau 3 (validation partielle) qui est majoritaire. Ce résultat est difficile à interpréter car l'intitulé proposé est ambigu : s'agit-il de modèles effectivement validés sur quelques cas particuliers bien définis ou de modèles seulement validés en partie, c'est-à-dire dont la validation n'est pas satisfaisante ? Nous discutons ce point plus loin.

Le niveau de validation est particulièrement bon (niveaux 1 et 2 cumulés) dans les domaines de la physique, des réseaux techniques et des transports. Il semble au contraire plus faible dans les domaines de la géographie, de l'économie et de la morphologie urbaine (moins du tiers des modèles atteignent le niveau 2). Les résultats par pôles (graphique ci-dessous) confirment ces différences entre le pôle géographie et le pôle physique. Le premier a largement recours au niveau 3 (50 % des modèles sont ainsi notés en validation partielle) tandis que les modèles bien validés (niveaux 1 et 2) représentent à peine le tiers des modèles. Dans le pôle physique, les modèles bien validés constituent la majorité (plus de 60 %) tandis que peu de modèles sont validés de manière partielle.



Niveau de validation par pôles

Cependant, il est clair que la validation d'un modèle ne présente pas la même portée ni la même difficulté dans ces différents pôles. On peut par exemple supposer que dans certains domaines du pôle géographie, la validation partielle est le meilleur niveau accessible, tandis que dans certains domaines du pôle physique, les modèles actuellement validés partiellement sont susceptibles de rejoindre les niveaux 2 ou 1 à moyen terme.

• Validation partielle

Pour affiner et nuancer les résultats précédents, en particulier ceux concernant la notion de validation partielle, on peut tenter de déterminer les limites de la validation en interrogeant les modélisateurs sur les cas ou les types de cas sur lesquels le modèle a été validé. Cette question de type texte est l'objet du champ 56 du questionnaire Inventur. Celui-ci est renseigné par un peu plus de la moitié de l'ensemble des modèles (56 %), beaucoup plus dans le pôle géographie (66 %) que dans le pôle physique (46 %), conformément aux résultats précédents.

Une analyse du contenu des réponses montre que la notion de validation partielle peut recouvrir au moins quatre acceptions différentes :

- la validation est partielle parce qu'effectuée seulement pour des **situations géographiques et temporelles particulières**,
- la validation est partielle parce qu'**une partie seulement du modèle est actuellement validée**,
- la validation est partielle parce que seuls **certains cas particuliers théoriques** ont été validés,

- d) la validation est partielle parce que réalisée par **comparaison avec les résultats fournis par la littérature** du domaine.

L'encadré ci-dessous illustre ces différents cas. On note que le cas (a) est le mieux représenté (ce qui paraît naturel pour la modélisation du champ urbain qui présente des situations locales toujours différentes) tandis que l'acception sous-entendue dans le questionnaire (cas c) apparaît mal représentée. Une acception intéressante est celle proposée par le cas (d) au travers duquel apparaît l'idée de comparaison de modèles (« benchmarking »).

a) La validation est partielle parce qu'effectuée seulement pour des situations géographiques et temporelles particulières

- Cinq quartiers dans quatre villes différentes de quatre pays différents. - 2
- Agglomération de Lyon, Bruxelles. Agglomérations nord et sud américaines - 3
- Le modèle a été valide sur base de mesures in-situ réalisées dans un lotissement de la province de Liege - 7
- Parc automobile (vignette) total par couronne (Ile-de-France), statistiques de trafic (TC et VP) - 9
- Le modèle a été appliqué à des négociations en mairie en Finlande. - 20
- Représentation de carrefours réels - 27
- Portions d'autoroutes - 28
- Validation définitive sur Lyon. - 30
- Comparaison des simulations effectuées en 1985 pour l'horizon 2000 par rapport à la situation des TCU en 1995. - 31
- Le modèle a été validé sur une agglomération (Brest) et est en cours de validation sur d'autres - 32
- Le modèle a été calé à l'aide des données de trois enquêtes déplacements sur l'agglomération lyonnaise (1976, 1986, 1995) et d'enquêtes cordon pour le trafic de transit. On a vérifié qu'il reproduisait correctement les tendances mises en évidence par ces enquêtes, ce qui est bien évidemment une validation très partielle. - 33
- Les résultats dépendent bien évidemment du modèle de ciel utilisé, à choisir en relation avec son application et l'objectif recherché. - 37
- Le modèle a été validé par le Laboratoire SURFACES sur différentes villes (Dakar...) et par le Laboratoire Image et Ville sur KUALA avec une variante par constitution multicritère des pondérations. - 39
- Habitat Byzantin de Syrie de nord. - 41
- Le modèle de Bottema (1996) a été validé sur le cas de villes nord-américaines - 45
- A cette échelle, la validation est permanente et jamais définitive. La collecte des données terrain (comptages, vitesse...) est permanente et doit être régulièrement mise à jour. - 46
- Le modèle n'a pu être validé que sur six mois. En effet (...) il est sensible au réseau de mesure sur lequel il est greffé. Or, le réseau caennais a fortement évolué six mois après le stade opérationnel. - 49
- Le système a été testé sur trois exemples de villes de morphologie urbaine similaire. Il reste à tester d'autres exemples de morphologies urbaines. - 59
- Certains cas réalisés avec UAMV ont été validés (...), mais en ce qui concerne notre cas de la ville de Lyon, on ne peut savoir jusqu'à quel niveau la validation (...) a été menée jusqu'ici par la société SAI - 61

b) La validation est partielle parce qu'une partie seulement du modèle est actuellement validée

- Validé dans sa partie routière. La validation pour la partie transports collectifs est en cours. - 19
- Le modèle a été validé dans le sens où il a été possible de reproduire correctement la structure spatiale de 1982, partant de 1954, pour quatre agglomérations différentes. Les mécanismes généraux introduits dans le modèle sont de ce fait validés. En revanche, il reste pour chacune de ces agglomérations des résidus importants au niveau communal - 22
- Calculs de distance à valider par rapport à méthode analytique de parcours d'un graphe - 24
- Moyenne et forme des lois de distribution des longueurs des liens entre noeuds. Forme des lois du nombre d'abonnés par zone. Répartition spatiale des échanges entre abonnés - 42
- La plupart des sous-modèles ont été validés avant leur inclusion dans SUBMESO. Les validations d'ensemble représentent le travail des années actuelles (1998 ...). - 43
- Les concepts du modèle (autonomie, niveaux d'analyse et contraintes) sont validés. Le prototype devrait disposer de davantage de méthodes d'analyse et d'algorithmes. - 57
- Validation des modèles de sources mécaniques uniquement. - 50
- En tant qu'outil d'analyse, le modèle est validé. En tant qu'outil de prévision, le travail sur la sensibilité du modèle doit être terminé. - 55

c) La validation est partielle parce que seuls certains cas particuliers théoriques ont été validés

- Nous avons utilisé des modèles entièrement synthétiques (Villes imaginaires) et un premier jeu de données construit à partir d'une représentation de Montmartre développée à l'IGN. - 1
- Etudes de couloirs simples avec mouvement de piétons dans les deux sens. - 16
- Validation partielle du modèle de propagation à l'échelle d'une rue (mesures sur maquettes acoustiques et in situ). Validation des modèles de sources mécaniques uniquement. - 50

- L'évaluation de notre modèle, on préfère ce vocabulaire à celui de validation, rencontre des difficultés propres au type de modèle. (...) L'évaluation a pour l'instant été effectuée sur une petite zone périurbaine, de type d'habitat 'pavillonnaire individuel' et de surface 5 hectares. - 63
- d) La validation est partielle parce que réalisée par comparaison avec les résultats fournis par la littérature du domaine**
- Le modèle a été valide par comparaison avec une étude analogue appartenant à la littérature. (Même géométrie et paramètres-> comparaison des résultats de la simulation). - 11
- Résultats identiques à ceux fournis par un autre modèle (EPANet) sur plusieurs réseaux, dont un ayant servi dans la littérature à valider EPANet par rapport aux mesures de terrain. - 53

• Problèmes rencontrés lors de la validation

Ces problèmes font l'objet du champ 58 de type texte du questionnaire Inventur, renseigné par un peu plus de 60 % de l'ensemble des modèles. Le décompte des occurrences de mots dans les réponses donne la liste suivante :

13 validation
 10 données
 9 mesure(s), problème(s)
 7 évaluation
 6 phénomène(s), paramètres
 5 documents, analyse, limite(s), situ, étude, difficulté(s), calage
 4 bâtiments, utilise(s), expérience(s), forme(s), matrice(s), nombre, méthode(s)
 3 hauteurs, acoustique(s), échelle, spatiale(s), résultat(s), dynamique, qualité, référence, base(s), campagne(s), logiciel, type(s), simulations, important(s), situation(s), ciel, existe, statistiques, espaces, niveau, transport(s), comportement(s)

Les données (disponibilité, acquisition) et/ou les mesures in situ semblent constituer les principaux obstacles à la validation. L'analyse du contenu des réponses va dans ce sens. En effet, trois classes de difficultés de validation peuvent être délimitées dont la première est de loin la mieux représentée : a) les **difficultés liées aux données d'entrée** (absence de données, difficulté d'acquisition, problèmes de correspondance entre les données disponibles et les entrées du modèle, forte sensibilité du modèle à la qualité des données) ; b) les **difficultés de validation liées au nombre important de paramètres** à contrôler ; c) les **difficultés liées à la nature du modèle**. L'encadré ci-dessous illustre ces trois cas.

- a) Difficultés de validation liées aux données d'entrée : absence de données, difficulté d'acquisition in situ, problèmes de correspondances entre les données disponibles et les entrées du modèle (traitement des données), forte sensibilité du modèle à la qualité des données**
- Comportements spécifiques à certains sites (exemple usagers ne payant jamais leur stationnement ni leurs contraventions, méthodes diverses pour ne pas payer...) - 2
 - Sensibilité très forte des données mesurées in-situ au mode d'occupation des espaces, particulièrement des espaces intérieurs. - 7
 - Enquêtes trop rares et entachées de fluctuations d'échantillonnage, donc validation sur statistiques globales - 9
 - Il existe peu de mesures complètes d'écoulement et de champ de température en milieu urbain ; les conditions limites à appliquer ne sont pas parfaitement connues - 10
 - Procédures de tests fastidieuses surtout pour de grands espaces. Il faut en outre faire des films et ensuite les analyser : de façon globale (au niveau du flux) et de façon locale (au niveau des mobiles). Ensuite, il convient de réaliser les simulations et d'effectuer la comparaison en choisissant des indicateurs de comparaison. Le nombre et le type de simulations à tester est également une étape fondamentale. - 16
 - [Le modèle] est soumis, à chaque étude, au calage et la validation du modèle mathématique construit, comme tout logiciel de ce genre. Ceci impose des campagnes de mesures en hydraulique et pollution. - 17, 18
 - La difficulté de la validation d'ANTONIN repose sur la constitution de matrices de base pour l'année de référence. En effet, la qualité de l'estimation des équations qui permettront d'estimer les changements de comportements des individus n'est pas à remettre en cause mais ces équations ne sont pas conçues pour générer des matrices de déplacement. La qualité des matrices de transports collectifs demande encore à être améliorée. - 19

- Les difficultés viennent plus de la collecte et de la mise en forme des données que de la validation des résultats. - 32
- Les enquêtes montrent leurs limites (taux de sondage approximatif de 1%) même dans un zonage macro-spatial. Il est par exemple quasi impossible de valider chacune des cases d'une matrice de distribution spatiale 25x25 : la validation se fait donc sur une agrégation de ce zonage. Enfin la validation ultime dépend de nouveaux recueils ultérieurs de données sur les déplacements à l'échelle de l'agglomération. - 33
- L'évaluation des apports solaires résulte de formules statistiques conformément à des types de ciel. Cependant, la plupart des simulations solaires expriment davantage des potentialités que des valeurs réelles climatiques (hypothèse de ciel clair dégagé) - 35
- Calculs analytiques sur des processus spatiaux inhomogènes. Disponibilité informatiques de données spatiales permettant de faire de tests systématiques - 42
- Il n'existe pas d'expérience de référence à l'échelle urbaine sub-meso. La campagne Marseille 2000 (projets URBCAP et ESCOMPTE) devrait fournir une telle base de données. - 43
- Peu d'expériences de référence à l'échelle d'une rue (voir projet d'expérience URBCAP Nantes 99). - 44
- Il existe peu de bases de données disponibles et de mesures in-situ. - 45
- Measuring 3D data fields, Collecting all input data - 47
- Pérennité du réseau de mesure au sol à partir duquel ce modèle est créé. - 49
- La mesure du champ acoustique in situ est limitée par la lourdeur de l'instrumentation à déployer (acquisition numérique multipistes) et par les contraintes typiquement urbaines (régulation du stationnement et de la circulation piétonne et automobile, encadrement par la police et personnels urbains,...). - 50
- La validation par rapport aux mesures présentera plusieurs problèmes comme le choix de l'emplacement des mesures, la détermination des coefficients du problème... - 53
- Problèmes de précision résultant d'erreurs contenues dans les plans de cadastre et provenant d'imprécision de dessin ou de saisie lors de la digitalisation. Problèmes de modélisation des hauteurs liés aux trois types de documents utilisés : documents où les informations concernant les hauteurs des bâtiments sont absentes, documents contenant les hauteurs des bâtiments exprimées en mètres mais dont la diffusion est confidentielle, documents contenant le nombre d'étages des bâtiments. Problèmes de modélisation des toitures qui sont essentiellement liés à la variété et à la complexité des formes des bâtiments et à l'absence des notions de limites dans les documents utilisés. - 59

b) Difficultés de validation liées au nombre important de paramètres à contrôler

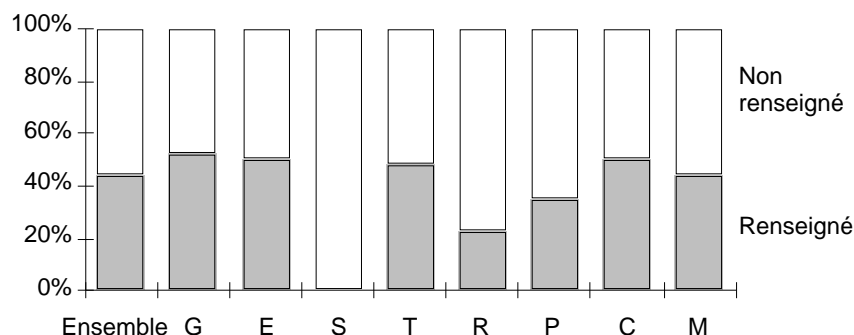
- Nombreux paramètres (conditions initiales, paramètres rhéologiques, discrétisation - 8
- Certains sous-modèles sont statistiques (par ex. les modèles de ciel). De ce fait, ils ne "miment" pas exactement la situation réelle rencontrée lors des mesures. De plus, le nombre de paramètres à contrôler est important, et certains phénomènes physiques importants (humidité, échange de chaleur latente) ne sont pas pris en compte par le modèle. - 11
- Le modèle possède un nombre importants de paramètres. Une évaluation robuste du modèle nécessite un jeu de données expérimentales conséquent, en terme de quantité de données mais aussi en terme de qualité. Le modèle fournit comme résultat de nombreuses grandeurs hydrologiques ; elles doivent idéalement être toutes évaluées. - 63

c) Difficultés de validation liées à la nature du modèle

- Les problèmes portent sur le calage en transport en commun. La difficultés proviennent du niveau de découpage de la zone d'étude, des rabattements aux gares et des pénibilités aux correspondances. - 5
- Ce processus met en jeu de nombreuses fonctions qui ne sont pas toutes assemblées sur une même plateforme. Le codage de toutes les fonctions de généralisation d'une part et de méthodes d'analyse spatiale d'autre part freine la validation du système qui est actuellement incomplet. La validation du modèle repose sur l'existence d'un prototype plus riche et plus accessible que celui utilisé pour concevoir le modèle. Assez peu de recherches ont été faites en analyse sur les groupes. La panoplie de méthodes est donc insuffisante. - 57
- Bugs de programmation. - 58
- Dans notre cas, le problème est lié au fait que la majeure partie du modèle est une boîte noire rendant les vérifications du programme impossibles. - 61
- Impossibilité de calibrage par une méthode analytique. Nécessité théorique d'une exploration systématique de toutes les valeurs de paramètres, pour les modules gravitaire et dynamique. - 62
- La difficulté est de savoir si on a bien utilisé le strict minimum de règles qui seraient nécessaires. On est aussi confronté à des ensembles d'expériences qui ne représentent pas nécessairement l'ensemble des situations possibles. - 64

• Méthodes de calibration ou de calage

La validation du modèle peut donner lieu à diverses calibrations ou calages des paramètres utilisés. Les méthodes mises en oeuvre pour ce faire sont décrites dans le champ 57 du questionnaire Inventur. Celui-ci est globalement mal renseigné, notamment dans les domaines du pôle physique (graphique page suivante).



État des réponses au champ 57

Tous domaines confondus, le décompte des occurrences de mots donne la liste suivante :

- 7 calage
- 6 valeurs
- 5 parametres, simulation(s), comparaison, mesures
- 4 reel(s), lineaire(s), transport, resultats
- 3 contraintes, offre(s), calibrage, experiences, type, etablissements, temps, donnees, calibration, autres, site(s), regression(s), methode(s), situations, verifier

Conformément à l'intuition, il semble que le calage des valeurs de paramètres se fasse par comparaison de résultats de simulations avec les mesures disponibles. Dans le détail, les réponses montrent deux types d'approches : **les méthodes statistiques** (régression linéaire, maximum de vraisemblance) permettant d'ajuster les résultats obtenus et les mesures ou enquêtes réalisées in situ ou en laboratoire ; **la comparaison des résultats du modèle avec ceux d'autres modèles** eux-mêmes calibrés, ou bien avec les résultats d'expériences de référence (ID 10, 28, 43, 44, 45). Cette approche (« benchmarking ») est notamment mise en oeuvre lorsque la mesure in situ est difficile, voire impossible.

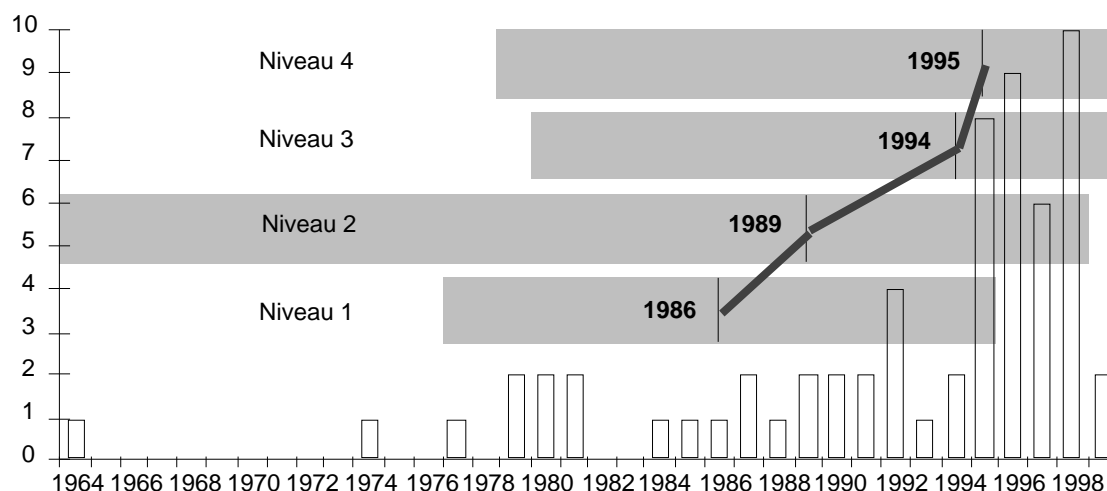
• Validation et âge des modèles

Existe-t-il une relation entre le niveau de validation et l'âge du modèle ? Si l'on détermine la plage temporelle de création et l'âge moyen des modèles par groupes de niveau de validation homogène, on obtient les résultats synthétisés dans le graphique ci-dessous.

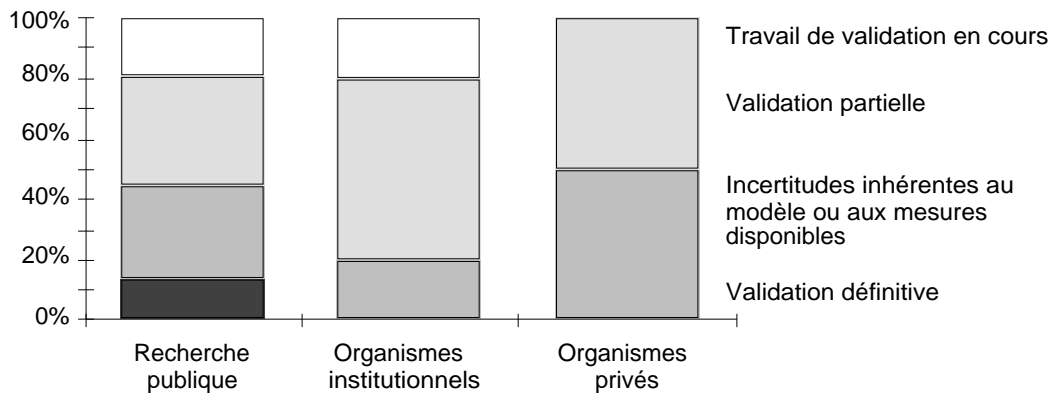
Tous domaines confondus, plus vieux est un modèle, meilleure est sa validation. Ce résultat est conforme à l'intuition. On peut également l'interpréter d'une autre manière : seuls résisteraient au temps des modèles bien validés.

• Validation et origine

Le niveau de validation diffère-t-il selon l'origine des modèles ? On observe sur le graphique ci-dessous que les modèles issus de la recherche publique (la très grande majorité) sont bien distribués entre les quatre niveaux de validation ce qui confirme les conclusions portant sur l'ensemble. A l'opposé, les modèles issus d'organismes privés sont tous validés au moins partiellement, mais aucun d'eux ne présente de validation définitive ; cependant, le niveau général est excellent. Entre ces deux catégories, les modèles des organismes institutionnels présentent une situation de validation partagée : aucun d'eux n'est validé de façon définitive, seuls 20 % atteignent le niveau 2 tandis que la majorité présente une validation partielle (avec les ambiguïtés signalées plus haut concernant cette notion). 20 % d'entre eux ne sont pas encore validés (validation en cours).



*Années de création des modèles suivant le niveau de validation
(en superposition : l'évolution chronologique de la production des modèles)*



Niveau de validation selon l'origine

• Validation et diffusabilité

Une attitude prudente conduirait à penser que le niveau de validation est susceptible de constituer une réserve quant à la diffusabilité d'un modèle. C'est ce que confirment les résultats du graphique ci-dessous qui montrent une forte corrélation entre les deux facteurs. Ainsi, mieux est validé un modèle, meilleure est sa diffusabilité et sa diffusion potentielle.

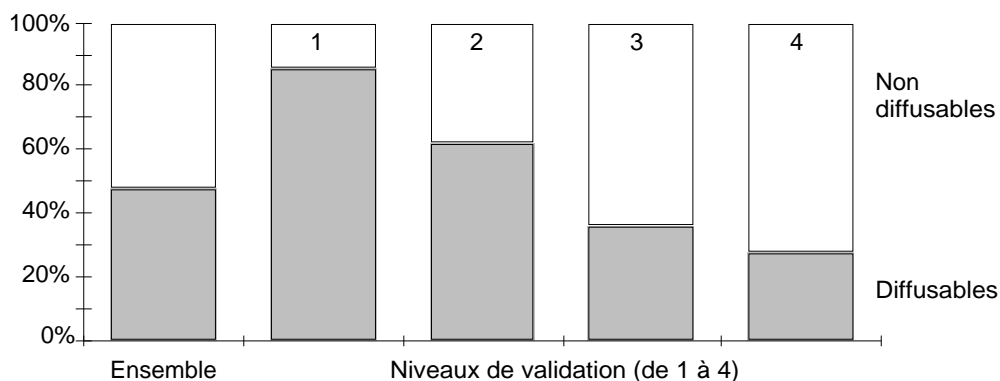
4.3.2 Niveau de documentation du modèle

• Bilan général

Le champ 81 du questionnaire Inventur propose 5 niveaux de documentation d'un modèle établis comme suit :

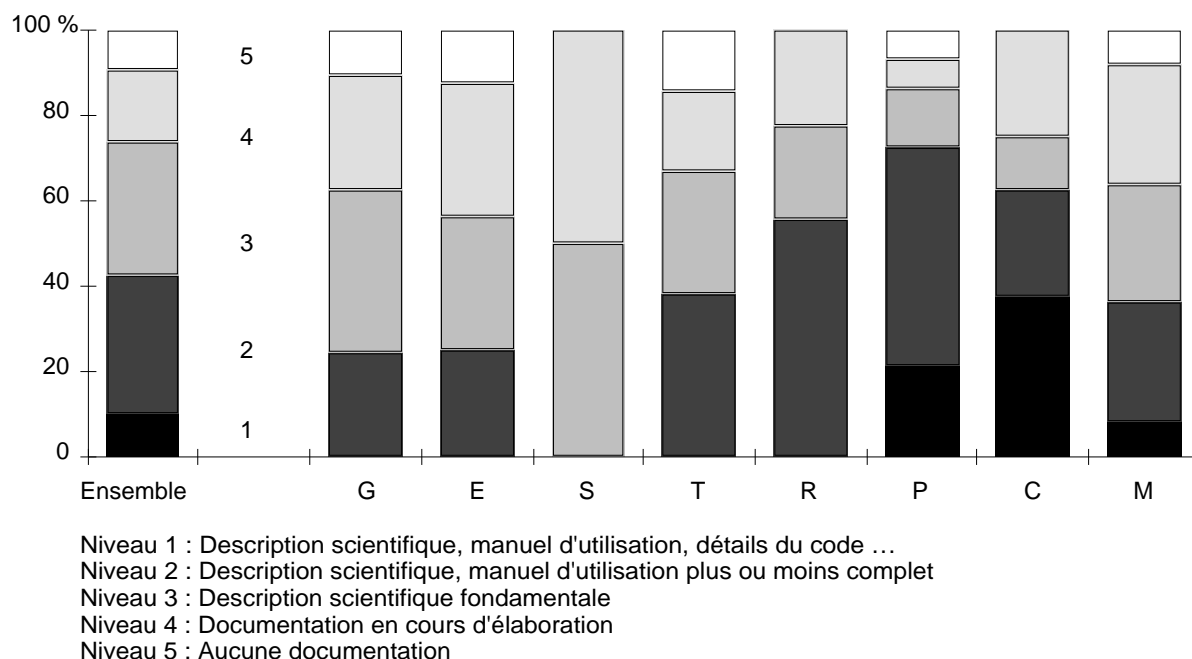
- Niveau 1 : Description scientifique, manuel d'utilisation, détails du code ...
- Niveau 2 : Description scientifique, manuel d'utilisation plus ou moins complet
- Niveau 3 : Description scientifique fondamentale (en pratique, une ou plusieurs publications sur le modèle)
- Niveau 4 : Documentation en cours d'élaboration
- Niveau 5 : Aucune documentation

Les résultats par domaines sont représentés dans le graphique ci-dessous. Dans l'ensemble,



Diffusabilité par niveaux de validation

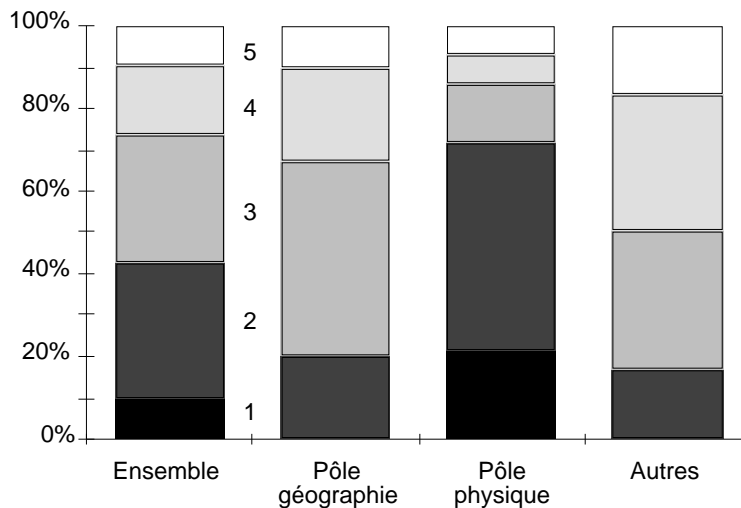
plus de 40 % des modèles atteignent le niveau 2 tandis qu'un quart d'entre eux n'avaient pas de documentation effective au moment de leur description (niveaux 4 et 5). On note que le niveau de documentation est très élevé dans le domaine de la physique et des risques (plus de 60 % des modèles atteignent le niveau 2 tandis que 20 à 40 % d'entre eux s'inscrivent dans le niveau 1). Le niveau est plus faible dans le domaine des transports, plutôt faible dans les domaines de la géographie et de l'économie.



Niveaux de documentation par domaines

Le décompte par pôles confirme les tendances précédentes (graphique page suivante). Ainsi, près des 3/4 des modèles du pôle physique atteignent le niveau 2, les autres étant partagés entre les niveaux 3 et 5. A l'opposé, 50 % des modèles du pôle géographie s'inscrivent dans le niveau 3, 20 % d'entre eux atteignent le niveau 2 et aucun le niveau 1.

Il semble donc que le travail de documentation soit relatif à la culture de la communauté scientifique des modélisateurs, fortement mis en avant dans les sciences exactes, moins dans les sciences sociales. Sans doute faut-il nuancer ce jugement par la nature et la valeur des publications scientifiques (niveau 3) suivant les différentes communautés. Il est possible en effet qu'une publication dans les domaines du pôle géographie fasse référence tandis qu'une autre dans le pôle physique puisse être moins valorisée.



Niveau de documentation par pôle

On remarque que, contrairement à la question concernant le niveau de validation, près de 10 % des modélisateurs n'hésitent pas à « avouer » ici que la documentation du modèle est inexistante (niveau 5). On peut discuter ce point, sachant que les utilisateurs des modèles inventoriés sont principalement les producteurs de ces modèles, c'est-à-dire des chercheurs connaissant intimement le fonctionnement du modèle. Sans documentation établie, cette connaissance peut être rapidement perdue.

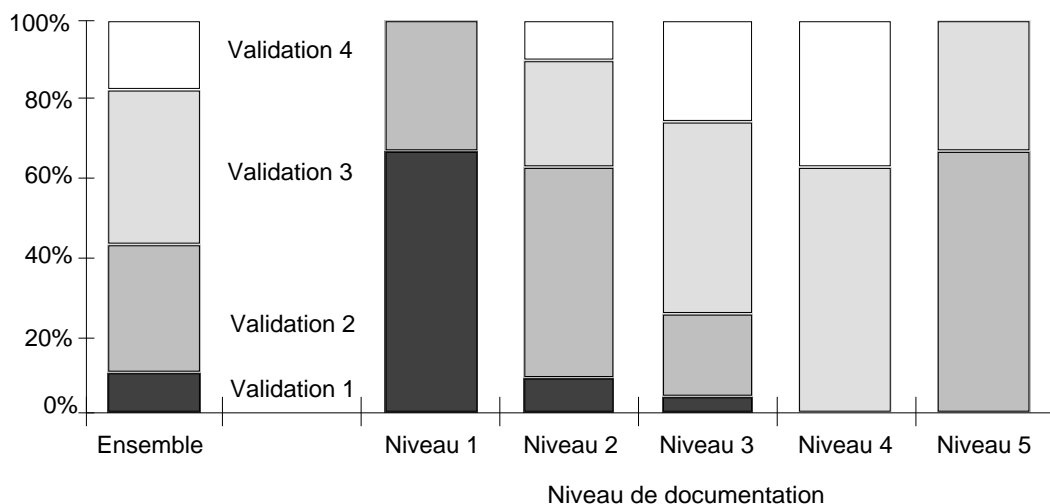
• Niveau de documentation et niveau de validation

A ce sujet, on peut s'interroger sur les corrélations entre le niveau de documentation et celui de validation d'un même modèle. Le graphique page suivante illustre ce point, à savoir la répartition des niveaux de validation par niveau de documentation des modèles, tous domaines confondus.

La corrélation est remarquable : mieux le modèle est documenté, mieux il est également validé. On note ainsi que les deux tiers des modèles ayant une documentation complète (niveau 1) ont également une validation définitive (validation 1), les autres s'inscrivant dans le niveau de validation 2. Parallèlement, les modèles pour lesquels la documentation est en cours d'élaboration (niveau 4) sont seulement partiellement validés ou en cours de validation.

Il existe donc une relation linéaire entre le niveau de documentation et le niveau de validation : les modèles ayant un bon niveau de documentation ont également un bon (voire très bon) niveau de validation. Inversement, les modèles dont la documentation est succincte, voire en cours d'élaboration, ont un niveau de validation plus faible. Seuls quelques modèles pour lesquels aucune documentation n'existe (niveau 5, ID 12, 36, 50, 56, 58, 62) ne vérifient pas cette relation.

La corrélation exprimée sur le graphique laisse penser que le travail de validation et celui de documentation sont menés parallèlement dans le processus de modélisation. Il semblerait qu'une fois le modèle conçu et développé, l'on mène d'abord le travail de validation puis, suivant les résultats, celui de documentation (qui peut se restreindre à l'écriture d'un article de la littérature scientifique). La documentation est d'autant mieux établie que la validation est probante, celle-ci étant elle-même fonction de l'âge du modèle (cf. plus haut). On en déduit que « la vie » d'un modèle, son usage régulier dans le temps, conditionnent sa qualité et que des modèles bien validés et bien documentés sont plutôt à rechercher dans les productions anciennes.



- 1 : Validation définitive
- 2 : Incertitudes inhérentes au modèle ou aux mesures disponibles
- 3 : Validation partielle
- 4 : Travail de validation en cours

Relation entre niveau de documentation et niveau de validation

• Restriction de diffusion de documentation

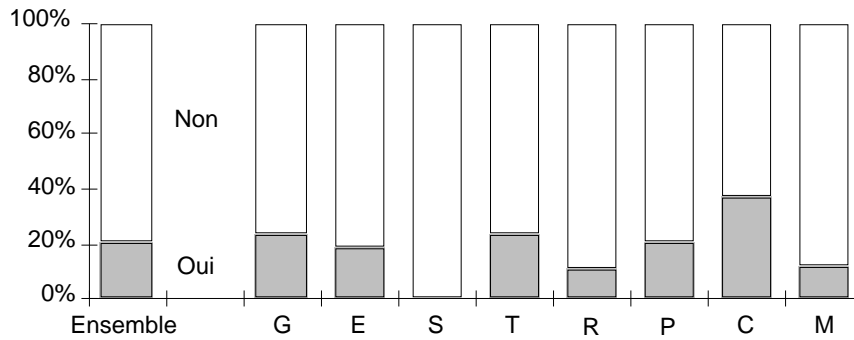
Il est possible que certains développeurs restreignent la diffusion de la documentation de leurs modèles, pour des raisons de protection scientifique ou industrielle, notamment. Ainsi, il peut arriver qu'une documentation complète existe sur un modèle, mais qu'elle ne puisse être intégralement mise à disposition d'un utilisateur quelconque. Par exemple, les modes d'exécution ou les méthodes numériques de certaines fonctions peuvent ne pas être documentés, bien que ces fonctions soient en pratique utilisables.

Ce point fait l'objet du champ 82, de type texte, du questionnaire Inventur. Parmi les réponses, hormis quelques détails sur la forme de la documentation, on note principalement 5 modèles qui font l'objet de restriction de diffusion de leur documentation (ID 10, 16, 19, 33, 61). Deux situations se présentent : certains détails du code restent confidentiels et ne sont donc pas diffusés (ID 10, 16, 19) ; la diffusion est soumise à l'accord du commanditaire « propriétaire » du modèle, spécialement lorsque ce modèle est dédié à une agglomération ou une situation particulière (ID 33, 61). On note que ces modèles sont tous (sauf ID 33) issus de travaux d'organismes institutionnels ou privés.

• Publicité du code

Le code développé pour le modèle est-il public ? Ce point fait l'objet du champ 77 du questionnaire. Nous pouvons aborder cette question sous l'angle de la documentation en considérant que le code est un bon vecteur de compréhension d'un modèle. La restriction de sa diffusion peut alors être comprise comme une restriction de documentation.

Les résultats sont synthétisés dans le graphique page suivante. Dans l'ensemble, 20 % des modèles ne rendent pas leur code public, cette proportion montant jusqu'à 37 % des modèles du domaine des risques, 24 % en géographie et 23 % dans le domaine des transports. L'ensemble concerne 13 modèles sur 64 dont 12 proviennent de laboratoires de recherche publique (l'autre d'un organisme privé). La protection des résultats industriels n'est donc pas en cause directement dans la protection du code. Dans l'ensemble cependant, 80 % des modélisateurs semblent prêts à diffuser le code de leurs modèles.



État des réponses au champ 77

4.3.3 Conclusion

• Sur la validation

Le niveau de validation est un élément essentiel pour juger de l'opérationnalité d'un modèle. On peut supposer que meilleure est la validation du modèle, plus fiable est celui-ci et plus l'usage que l'on en fait peut être efficace et serein. Le niveau de validation permet dans ce sens d'affecter un degré de confiance aux modèles.

L'ensemble des modèles présente un niveau de validation relativement élevé, notamment dans les domaines du pôle physique, avec 60 % des modèles validés définitivement ou presque (incertitudes inhérentes au modèle ou aux mesures disponibles). Dans les domaines du pôle géographie, les modèles présentent majoritairement une validation dite « partielle ». On nuancera la comparaison en remarquant que la validation d'un modèle ne présente pas la même portée ni la même difficulté dans les deux pôles : on peut ainsi supposer que dans certains domaines du pôle géographie, la validation partielle est le meilleur niveau accessible compte tenu des connaissances ou de la complexité des phénomènes représentés ; à l'inverse, dans certains domaines du pôle physique, les modèles actuellement validés partiellement sont susceptibles d'être validés complètement à moyen terme. On notera à ce sujet que le niveau de validation partielle est fortement représenté dans les modèles issus d'organismes institutionnels, dont les résultats ne peuvent être supposés produits trop légèrement.

La notion de validation partielle est à ce titre ambiguë et l'on répertorie dans l'inventaire au moins quatre situations qui se prêtent à cette qualification. Ainsi, la validation peut être définie comme partielle parce qu'effectuée seulement pour des situations géographiques et temporelles particulières (la majorité des situations recensés) ou bien sur certains cas particuliers théoriques limités, ou encore parce qu'une partie seulement du modèle est validée, ou bien parce que la validation a été réalisée seulement par comparaison avec les résultats disponibles dans la littérature du domaine (la minorité des situations). On le voit, la notion de validation partielle renvoie à des situations très diverses et peut être parfois considérée comme une catégorie euphémistique lorsque le travail de validation n'est pas réellement achevé.

Il faut cependant remarquer que dans tous les domaines, plusieurs obstacles viennent compromettre le travail de validation. Ceux-ci sont liés en grande partie aux données disponibles (absence des données utiles, difficultés d'acquisition *in situ*, problèmes de correspondances entre les données disponibles et les entrées du modèle, forte sensibilité du modèle à la qualité des données, etc.), au nombre important de paramètres à contrôler dans

le modèle, ou encore à la nature même du modèle dans son état actuel. Mais un modèle non validable est-il encore un modèle ?

De manière plus optimiste, on note que le calage ou la calibration des paramètres du modèle, par comparaison avec les situations observées ou les expériences de laboratoire, ou encore par des approches de type « benchmarking », font l'objet d'un travail qui (lorsqu'il est signalé, c'est-à-dire pour une minorité de modèles), semble important. On notera également que le niveau de validation est parfaitement corrélé à l'âge des modèles. Ce résultat est conforme à l'intuition mais on peut l'interpréter d'une autre manière : seuls résisteraient au temps des modèles bien validés. Dans tous les cas, mieux vaut faire confiance aux modèles les plus anciens dans un domaine donné lorsque le choix se présente. On remarquera d'ailleurs que les modèles les mieux validés sont également les mieux diffusés et donc les plus accessibles.

• Sur la documentation

Dans l'ensemble, plus de 40 % des modèles inventoriés présentent un bon niveau de documentation, mais ce résultat doit être nuancé suivant les domaines. Ainsi, le niveau de documentation est globalement très élevé pour les modèles du pôle physique et beaucoup plus faible dans ceux du pôle géographie. Il semble donc que la valeur du travail de documentation soit perçue différemment suivant les communautés scientifiques : fortement mise en avant dans les sciences exactes, moins dans les sciences sociales.

On note dans le même sens que contrairement à ce que l'on observe pour la validation, près de 10 % des modélisateurs reconnaissent que la documentation du modèle est inexistante. Ce point pose question, sachant que les utilisateurs des modèles sont souvent les producteurs de ces modèles (cf. § 3.1), c'est-à-dire des chercheurs connaissant intimement leur structure et leur fonctionnement. Sans documentation établie, cette connaissance peut être rapidement perdue et la validation du modèle peut-être rendue plus difficile (compréhension délicate ou ambiguë, mauvaise connaissance des hypothèses et limites, par exemple).

On constate d'ailleurs que, tous domaines confondus, les niveaux de documentation et de validation sont fortement corrélés : les modèles ayant un bon niveau de documentation ont également un bon (voire très bon) niveau de validation. Inversement, les modèles dont la documentation est succincte, voire en cours d'élaboration, ont un niveau de validation plus faible. La documentation est d'autant mieux établie que la validation est probante, celle-ci étant elle-même fonction de l'âge du modèle. On en déduit que « la vie » d'un modèle, son usage régulier dans le temps, conditionnent sa qualité. Ainsi, en moyenne, les modèles bien validés et documentés seraient plutôt à rechercher parmi les plus anciens.

Enfin, on note de manière plus optimiste que peu nombreux sont les modèles pour lesquels il existe une restriction de documentation résultant de problèmes de protection industrielle ou de confidentialité. Par ailleurs, 4 modélisateurs sur 5 semblent prêts à diffuser le code de leurs modèles.

5.

Aspects scientifiques de la modélisation urbaine

Données, concepts et méthodes mis en oeuvre

5.1 Données et résultats

L'une des difficultés de mise en oeuvre des modèles a trait aux données d'entrée, qui peuvent ne pas exister (elles doivent le cas échéant faire l'objet d'enquêtes ou de mesures in situ), qui peuvent exister mais ne pas être publiques, ou dont l'acquisition et le traitement nécessitent des moyens importants. Nous allons ici tenter de mieux cerner la nature des données nécessaires en entrée des modèles urbains ainsi que les modalités pratiques de leur acquisition. Nous poursuivrons avec une analyse succincte de la nature des résultats produits par ces modèles à partir des données initiales.

5.1.1 Nature des données en entrée du modèle

• Bilan

La nature des données en entrée du modèle fait l'objet du champ 61 du questionnaire. Ce champ est renseigné par tous les modèles sauf un (ID 26). Les réponses présentent une moyenne de 24 mots. L'analyse des occurrences de mots donne la liste suivante :

```
42  donnee(s)
18  population(s)
13  reseau
11  source(s), fichier(s)
10  transport(s), type
9   temps, enquete(s)
8   vitesse(s), menage(s)
7   niveau, scene, polluant(s), emploi(s), occupation
6   elements, noeud(s), offre, vent(s), batiments, altitude(s), surface(s),
    geometrique(s), deplacement(s), geometrie(s)
5   arcs, communes, systeme(s), reseaux, pluie, longueur(s), forme(s), nombre,
    caracteristiques, emission(s), flux, temperature(s), conditions,
    coefficient(s), spatiale(s), position(s), comportement(s), activite(s)
4   agglomeration(s), plan(s), zone(s), description, collecteur, volumes, lieux,
    fonction(s), debit(s), physique(s), facettes, motorisation, sols, pollution,
    localisation
```

Tous domaines confondus, une grande part des données sont de type socio-économique (description de la population, des ménages ou des emplois par exemple). Les données relatives aux réseaux et aux transports sont également très présentes (offre de transport, déplacements, arcs et noeuds d'un réseau, etc.). Pour le reste, des paramètres physiques (polluants, vent, altitude, surfaces, températures, pluie, etc.) ou encore morphologiques (bâtiments, géométrie, plans, facettes, etc.) constituent l'essentiel des données.

On peut mener le même décompte dans chacun des deux pôles. Nous obtenons pour le pôle géographique :

```
18  donnee(s)
16  population(s)
10  transport(s)
8   enquete(s), menage(s)
7   emploi(s)
6   reseau, offre, deplacement(s)
5   temps, communes
4   lieux, niveau, motorisation, fichier(s), comportement(s), activites,
    localisation
3   code, noeud(s), agglomeration(s), type, géographique(s), spatiale(s),
    zone(s), dates, reseaux, description, socio, distance, commerciale(s),
    occupation, stationnement
```

Les mots les plus fréquents du pôle physique sont parallèlement :

- 16 donnees
- 10 source(s)
- 7 reseau, type, polluant(s)
- 6 fichier, vitesse, vent(s), altitude(s)
- 5 pluie, nombre, surface, emission(s), scene, temperature(s)
- 4 temps, longueur(s), collecteur, occupation, debit(s), flux, coefficient(s), physique(s), conditions, batiments, geometrie(s), geometrique(s)
- 3 arcs, niveau, concentration(s), repartition, spectre(s), cotes, noeuds, station(s), rugosite(s), forme, pente, pollution, position, fonction, meteorologiques, topographie, etat, facettes, relief, sols, humidite, meteo

Conformément à l'intuition, il apparaît que les données des modèles du pôle géographie sont majoritairement de type socioéconomique (population, ménages, activités) et concernent avant tout les transports (réseau, offre, déplacements, temps) ou encore les emplois. La description des entités urbaines s'effectue suivant les grands découpages socioéconomiques que sont les communes ou les agglomérations. Ces résultats sont liés aux échelles des modèles de cette catégorie, principalement celle de la ville et des systèmes de villes.

Dans le pôle physique, les données décrivent les sources des phénomènes en jeu (sources de pollution par exemple), les phénomènes eux mêmes (principalement climatiques : pluie, vent, température, météorologie, humidité, etc.) et l'organisation morphologique des objets urbains (altitude, longueur, géométrie, forme, pente, position, topographie, facettes, relief, sol, etc.). Ce constat est conforme au fait que la majorité de ces modèles travaillent à l'échelle du fragment urbain. Par ailleurs, les données de toute sorte s'organisent suivant des grandeurs physiques communes (vitesse, débit, flux, concentration, spectre, rugosité, etc.).

• Typologie

Une analyse de contenu des réponses permet de dégager globalement cinq grands types des données en entrée des modèles du champ urbain, tous domaines confondus :

- a) les données permettant la **description spatiale ou morphologique des entités urbaines** modélisées, en 2D (sous forme raster ou vectorielle) et/ou en 3D : localisation géographique (d'entités, d'objets, de ménages ou d'individus), images satellitaires, cadastre, topographie (relief, modèle de terrain), volumétrie des objets (2D 1/2 ou 3D suivant différents formats) ;
- b) les **caractéristiques physiques, fonctionnelles ou comportementales** des entités, objets ou individus modélisés. Ce sont par exemple les conditions limites en bordure du domaine, les spectres de réflexion des matériaux, la stratification et le comportement mécanique des sols, des grandeurs physiques caractéristiques (températures, concentration, rugosité, coefficient de ruissellement, etc.), le fonctionnement d'une ligne de feux ou un modèle de comportement humain.
- c) les données décrivant des **phénomènes physiques** naturels ou anthropiques modélisés comme par exemple : les données météorologiques (température, vitesse du vent, humidité, turbidité, nébulosité, etc.), les sources de pollution de l'air, de l'eau ou sonore (position des sources, spectres d'émission, inventaire spatio-temporel par espèces, etc.) ;
- d) les **données socioéconomiques** générales (ménages, emplois, actifs, chômage, qualification, revenus, matrices de migrations interurbaine, etc.), les activités (surfaces commerciales, offre commerciale alimentaire, industries, services), l'environnement (pollution, qualité de la vie, situation sanitaire), le logement ;
- e) des **données spécifiques aux déplacements et aux transports** : description des réseaux de transport en commun ou du réseau routier, offre et demande, matrices de déplacement, motorisation des ménages, rotation de stationnement, trafic (débit, vitesse, type de véhicules, volumes des flux et lois horaires, temps de parcours, etc.), coûts, horaires des liaisons, etc.

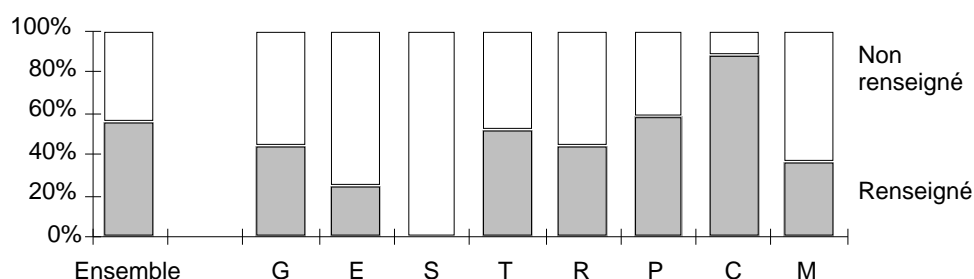
Ces 5 types de données recouvrent la quasi totalité des réponses, chaque modèle pouvant naturellement utiliser plusieurs de ces types. On peut remarquer que les catégories a) et b) visent à fournir une **description spécifique des entités en jeu** : description spatiale, géométrique, physique ou fonctionnelle d'entités isolées, qu'elles soient des objets matériels ou des individus. Lorsque les entités ne peuvent pas être isolées (du fait de leur grand nombre comme dans le cas des déplacements par exemple, cf. type e), on utilise des « macro-descripteurs spécifiques » comme les matrices de déplacement, les volumes et flux, etc.

Parallèlement, pour des problèmes de natures différentes, les données de type c) et d) forment toutes des **descriptions contextuelles du système modélisé**, qu'elles soient socio-économiques (population, activités, logement ...) ou physiques (sources de pollution, données météorologiques, etc.).

Au total, on pourrait donc proposer une typologie générale des données des modèles urbains en deux grandes catégories qui sont d'une part les descripteurs spécifiques des entités mises en jeu dans le modèle, et d'autre part les descripteurs contextuels décrivant l'environnement dans lequel ces entités agissent.

• Intéropérabilité en entrée

Les données d'entrée sont-elles issues d'un ou plusieurs autres modèles ? Ce problème d'intéropérabilité fait l'objet du champ 62, de type texte, du questionnaire Inventur. Celui-ci est plutôt mal renseigné pour l'ensemble des modèles : tous domaines confondus, à peine 60 % des modèles proposent une réponse (graphique ci-dessous), et une partie d'entre eux répondent négativement. Le taux de réponse est plutôt meilleur dans les domaines relatifs à la physique et aux transports, plutôt moins bon dans les domaines de la géographie, de l'économie et des morphologies.



État des réponses au champ 62

Au total, une forme au moins d'intéropérabilité en entrée du modèle semble exister pour un peu plus d'un tiers des modèles inventoriés (23 sur 64). L'analyse du contenu des réponses permet de dégager des modes d'interopérabilité de trois types : a) avec un autre modèle (dont les résultats servent de données au modèle décrit) ; b) avec un modèleur géométrique (pour les données de ce type) ; c) avec une base de données, voire un SIG. Des illustrations de chacun de ces modes sont données dans l'encadré ci-dessous (extraits littéraux des réponses à l'inventaire).

a) Intéropérabilité avec un autre modèle (dont les résultats servent de données au modèle décrit) :

- la météo peut provenir de modèles de Météo-France
- les données de flux peuvent avoir été générées par des outils mathématiques et/ou informatiques
- flux provenant du ciel (modèles de ciel), flux solaires incidents (SOLENE-ensoleillement)
- Les catégories d'activité nécessaires n'existent pas dans les statistiques et ont dû être recomposées à partir du modèle du minimum requis de Alexandersson
- Les projections de population se font à partir d'une modification du modèle de René Bussière, modèle de répartition de la population par une fonction exponentielle négative.

- on utilise souvent un modèle analytique pour simuler un écoulement atmosphérique non perturbé arrivant sur un site
- Les vitesses dans les arcs peuvent être issues de modèles de calcul hydraulique (donnant les vitesses et les pressions) à partir des demandes en eau, comme Porteau (Cemagref) ou EPANet (Environmental Protection Agency).
- Matrice de déplacements issues du modèle de la Direction de l'Équipement Ile de France.
- Sols : modèles d'occupation des sols, modèles de terrain, rugosités (ASTUCE).
- Sources de pollution : modèles d'émissions automobiles (taux d'émission, trafic...)
- Modèles de trafic.
- Graphes d'espaces théoriques (arcs et nœuds) générés par le modèle RES.

b) Interopérabilité avec un modèleur géométrique (pour les données de ce type) :

- données géométrique issu du modèleur géométrique ARC+ ou données au format DXF en import
- Le modèle le plus détaillé d'un réseau peut en effet provenir de l'utilisation de la base de données techniques utilisée par le SIG décrivant la physique du réseau, que l'on couple avec la base de données contenant les volumes facturés aux clients (ce qui permet d'obtenir les données statistiques sur les consommations). Il faut ensuite à partir de ce modèle pouvoir construire automatiquement d'autres modèles moins détaillés, mais adaptés à l'application spécifique visée
- Plans de ville scannés ou importés d'applications spécialisées : système d'information géographique, logiciels de DAO par exemple Autocad ...

c) Interopérabilité avec une base de données, voire un SIG :

- BD géographiques vectorielles.
- Utilisation de bases de données type TRAPU (IGN), CORINE LandCover.
- On peut imaginer un couplage avec un SIG, en entrée comme en sortie.

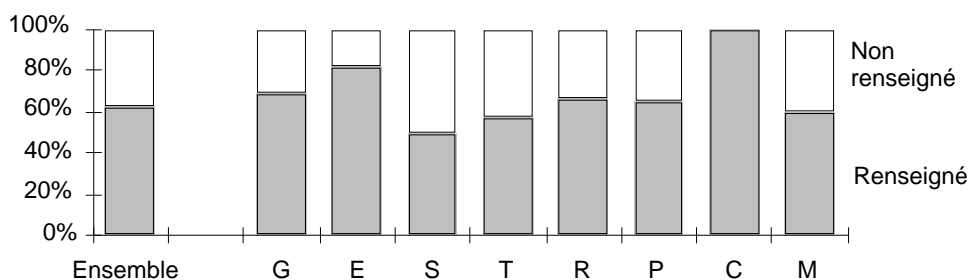
• Méthodes d'acquisition employées pour les autres données

Lorsque les données ne sont pas obtenues d'un autre modèle, selon les modalités décrites ci-dessus, comment le sont-elles en pratique ? Le champ 63 du questionnaire permet de répondre à la question. On note que le champ est moyennement renseigné (graphique ci-dessous), plutôt mieux dans les domaines de la géographie et de l'économie qui semblent grands consommateurs de données hétérogènes.

Le décompte des occurrences de mots donne la liste suivante :

27 donnees
 9 enquete(s)
 7 insee, mesure(s)
 6 terrain
 5 recensement(s)
 4 laboratoire, menage(s)
 3 tours, graphes, image(s), fournie(s), manuelle, entree(s), acquisition

Il semble que les enquêtes, les données INSEE, les mesures et relevés sur le terrain ou les résultats des recensements soient des sources importantes de données urbaines. Pour le reste, l'acquisition manuelle ou le recours au travail de laboratoire sont également à citer.



État des réponses au champ 63

L'analyse des réponses permet de classer les modes d'acquisition des données en trois groupes : a) l'acquisition auprès d'un **organisme prestataire extérieur** pour les données existantes ; b) l'acquisition par **enquêtes, mesures et observations** sur le terrain pour les données inexistantes ; c) **l'acquisition par d'autres moyens** : saisie manuelle de données (3D), digitalisation, etc. L'encadré ci-dessous illustre ces trois possibilités.

a) Données existantes acquises auprès d'un organisme prestataire extérieur

- enquêtes auprès des administrations (cadastre, police, trésor public, mairie), données des service du cadastre, service des impôts
- données de l'agence d'urbanisme (utilisation du sol, MOS, RGP INSEE)
- relief : auprès de l'IGN
- Acquisition de données : cartographies, plans, photos, archives, levés topographiques, campagnes de mesures, INSEE, Distribution eau potable
- Proviennent du Recensement Général de la Population, du fichier SIRENE de l'INSEE, de l'IAURIF
- Recensement
- Caractéristiques de la zone urbaine modélisée : utilisation des banques de données urbaines, gérées par les collectivités locales
- Données fictives ou de recensement
- Topographie : IGN.
- Occupation des sols : IFEN, CORINE LAND COVER.
- Achat à l'INSEE
- CERTU (enquête ménage) / SYTRAL (autorité organisatrice) / STLL (société exploitante)
- Données INSEE / Données IGN / Données CCI
- Données issues des recensements (INSEE) ou des ou auprès des entreprises
- Système d'Informations Géographiques Régional (SIGR)
- émissions : CITEPA, CORINAIR
- Description des scènes (DXF) : relevés faits par des bureaux d'étude, ou par les concepteurs des projets
- Réseau de mesure au sol géré par un association de suivi de la qualité de l'air. - 49
- Distribution eau potable
- évapotranspiration potentielle : classement fournie par la station météo la plus proche

b) Données acquises par enquêtes, mesures et observations spécifiques sur le terrain

- Enquêtes globales transports
- enquêtes ménages/déplacement
- enquêtes sur le terrain
- L'enquête ménage est réalisée par enquêtes en face à face
- enquêtes emplois
- enquête de préférence déclarée pour le choix de localisation des ménages
- Les données sont toujours acquises par des observations de terrain
- sondages : essais in situ, prélèvement d'échantillon et essai en laboratoire
- mesures
- Fournies par le client ou obtenues par comptages sur le terrain
- campagnes de mesures
- Météorologie : extraction possible de sondages atmosphériques.
- données de Météo France ou analyses du centre européen de prévision à moyen terme.
- données fournies par le JRC de ISPRA obtenues de CORINAIR 90
- Pluie : classement, par pluviomètres

c) Données acquises d'autres sources : saisie manuelle de données (3D), digitalisation, etc.

- Données physiques (coefficients): tables dans la littérature
- Travail préalable et en partie manuel sur des données brutes
- saisie manuelle du trafic
- bâtiments : à digitaliser
- Données photométriques : mesures de laboratoire (en particulier, Laboratoire de Photométrie du LCPC) ou données constructeurs lorsqu'elles sont disponibles
- Exploitation photogrammétrique d'images traitées
- Scannerisation ou importation sous format d'image (Bmp, Gif, raw)
- Textures, sous forme de photographies digitalisées
- Données géométriques: modeleur
- interface d'entrée DXF, pour les échanges de données 3D avec des modeleurs de solides existants
- Acquisition de données : cartographies, plans, photos, archives, levés topographiques
- Sols : extraction de données à partir des cartes (manuelle)
- Map comporte un module de création de graphes, à partir d'images scannées de cartes
- Graphes d'espaces observés élaborés par les membres du Laboratoire du CESA de Tours

• Sensibilité du modèle

La sensibilité du modèle aux données d'entrée ou aux paramètres et hypothèses utilisés, ainsi que la méthode mise en oeuvre pour l'analyse de sensibilité, font l'objet du champ 54 du questionnaire. Celui-ci est renseigné par 55 à 65 % des modèles, selon les domaines.

Parmi les réponses, 10 déclarent ne pas connaître la sensibilité (étude à réaliser ou en cours), tandis que 4 donne la méthode d'analyse mise en oeuvre. Pour les autres réponses (25), la sensibilité du modèle est plus ou moins détaillée. Il apparaît que la sensibilité aux paramètres de la modélisation et aux hypothèses utilisées est prépondérante : sensibilité aux hypothèses de croissance des revenus et du prix des carburants (ID 9), rôle prépondérant de l'hypothèse d'évolution des revenus (ID 31), forte sensibilité au contexte économique (croissance et revenus) interne et externe à l'agglomération (ID 33), sensibilité des modèles de turbulence aux processus de recirculation de l'écoulement (ID 44), etc.

La sensibilité à la qualité et à la précision des données d'entrée (données climatiques, données géométriques, schéma de discrétisation, etc.) est également citée mais elle paraît globalement moins importante (sous réserve d'une analyse approfondie).

5.1.2 Nature des résultats produits par le modèle

• Bilan

A partir des données d'entrée, les modèles produisent divers résultats dont on peut chercher à qualifier la nature. Ce point fait l'objet du champ 64 du questionnaire. Naturellement, ce champ est renseigné par tous les modèles, avec une moyenne de 23 mots par réponse.

Tous domaines confondus, le décompte des occurrences de mots donne la liste suivante :

10 champ(s)
9 temps, resultat(s), valeurs, deplacement(s), ville(s)
8 concentration(s), carte(s), flux, polluant(s)
7 zone(s), differents, reseau, evolution(s), differentes
6 debit(s), heure
5 parametres, donnees, forme(s), population(s), modele, effet(s), fonction(s), charge, point(s), niveaux, image(s), volume(s), vehicules
4 permettant, modelisation, indicateurs, calcul, spatiale, solution(s), matrice(s), espace(s), vent, temperature(s), mode, surface(s), distribution, pointe, troncon(s), reseaux, vitesse(s), nombre
3 temporels, noeud(s), courbe(s), occupation, plan, visibilite, travail, phenomene(s), emergence, experimentations, site(s), systeme, locale(s), mesure(s), humidite, numerique(s), jour, solaires, taux, transport(s), trafic, type, menages

Les termes de cette liste mélangent des notions diverses et semblent difficiles à interpréter globalement. Le décompte par pôles paraît plus clair. Ainsi, les occurrences de mots dans le pôle géographie s'établissent comme suit :

8 deplacement(s)
7 zone(s)
6 temps, evolution
5 parametres, donnees, population(s), carte(s), resultats, vehicules
4 valeurs, forme(s), solution(s), matrice(s), mode, nombre
3 temporels, niveaux, occupation, plan, charge, locale(s), espace(s), mesure(s), taux, pointe, heure, troncon(s), trafic, menages

Parallèlement, on obtient dans le pôle physique la liste suivante :

10 champ(s)
8 concentration(s)
7 polluant(s)

- 6 reseau, flux
- 5 debit(s), valeurs
- 4 resultat(s), point(s), vent, temperature(s), surface(s)
- 3 fonction, modelisation, effet(s), calcul, volume(s), humidite, heure, solaires

Au total, les modèles du pôle géographie semblent s'intéresser avant tout à l'évolution temporelle de divers paramètres circonscrits par zones. Les résultats prennent forme sur des cartes ou dans des matrices. Ils concernent les déplacements, la dynamique de la population, des ménages ou du trafic de véhicules.

Les modèles du pôle physique semblent quant à eux produire principalement des champs de diverses quantités, et notamment de concentration de polluants, des valeurs de flux et de débits en certains points, concernant entre autres le vent, la température, l'humidité, etc.

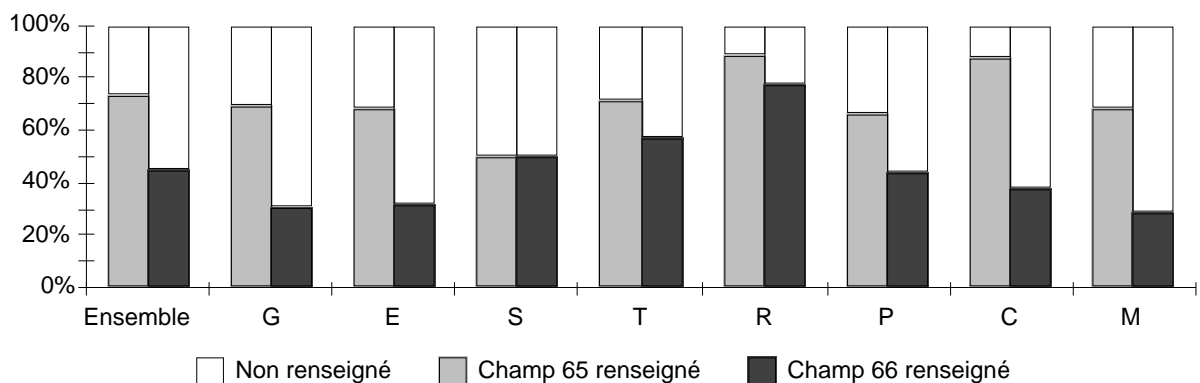
On retrouve dans ces résultats l'intérêt prédominant des modèles urbains pour les questions relatives aux transports et à leurs conséquences dans la ville, notamment au travers de la pollution atmosphérique.

• Post-traitements

Les résultats produits peuvent prendre différentes formes, comme le suggèrent les constats ci-dessus : indicateurs cartographiques, champs 2D et 3D mais aussi images, courbes, fichiers de valeurs, paramètres divers, etc. Le plus souvent, l'interprétation de ces résultats nécessite une phase de post-traitements ou de mise en forme qui peut s'effectuer dans le modèle lui-même ou par l'entremise de divers outils extérieurs au modèle.

L'existence et le type de post-traitements des résultats font l'objet du champ 65 du questionnaire. Si ces post-traitements ne sont pas gérés en interne par le modèle, le champ 66 du questionnaire permet de décrire quels autres outils peuvent être utilisés pour ce faire.

Les états des réponses à ces deux champs sont représentés dans le graphique ci-dessous. Le champ 65 est globalement bien renseigné, notamment dans les domaines des réseaux techniques et des risques. Le champ 66 apparaît quant à lui complémentaire du précédent : si les post-traitements ne sont pas assurés en interne par le modèle, ils peuvent l'être par un outil extérieur. Seuls les domaines des transports, des réseaux et de la physique montrent un quasi équivalence des états des réponses aux deux questions.



État des réponses aux champs 65 et 66

Le calcul des occurrences de mots dans les réponses au champ 65 donne la liste suivante :

- 7 calcul(s), simulation(s)
- 6 cartographi(que), scene, traitement(s)
- 5 resultats, analyse(s), carte(s)

- 4 descripteurs, population(s), evolution(s), reseau, objet(s), tableaux, statistique(s), visualisation(s)
- 3 issues, solaire(s), temps, animation, habillage, indicateur(s), comparaison(s), long, plan(s), graphique(s), spatiale(s), exemple

De manière interne au modèle, les résultats semblent avant tout être mis en oeuvre comme base de différents calculs et simulations. Ils sont visualisés de manière cartographique, ou sous la forme de descripteurs et de tableaux statistiques. Hormis le support de la carte, la représentation graphique peut également s'effectuer sous la forme de courbes et profils, ou encore d'images de synthèse ou d'animations.

Pour le champ 66, les mots les plus fréquents sont les suivants :

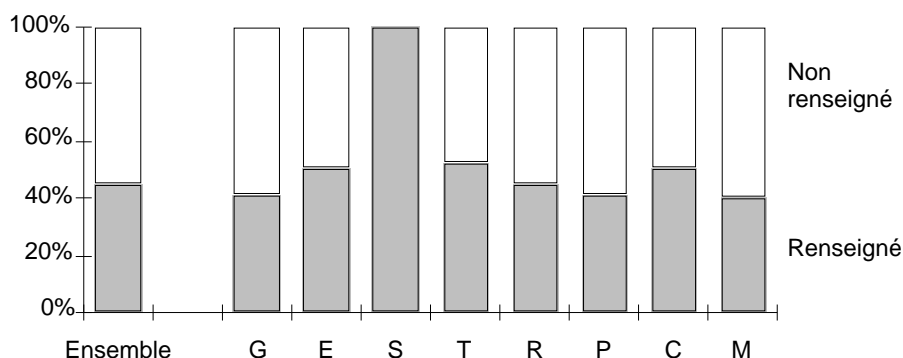
- 7 resultats
- 6 graphiques, logiciel(s)
- 5 tableur(s)
- 4 exportation, excel, possible
- 3 autocad, type, statistiques, donnees, traitement(s)
- 2 erreurs, essais, injection(s), word, powerpoint, tecplot, outils, programme(s), gasp, plateforme, optique, visualisation

Lorsque les post-traitements ne sont pas effectués par le modèle, ils peuvent être réalisés par l'entremise de différents logiciels, notamment graphiques (exportation vers Autocad, Tecplot) ou des tableurs (Excel). Des traitements statistiques sont également utilisés.

L'analyse du contenu des réponses à ce champ montre que les outils de post-traitement mis en oeuvre sont généralement des outils du commerce, de type bureautique (sont cités : Excel, Word, Powerpoint) ou graphique : pour la visualisation des résultats (sont cités : Ensignt, TECPLOT), pour l'illustration 2D ou 3D (sont cités : Autocad, Lotus Freelance, Corel Draw, Adobe Illustrator), ou encore pour la génération d'images de synthèse et d'animations (sont cités : POV-Ray, SAVI 3D, MAYA, 3DSMAX, SOFTIMAGE). Quelques mentions sans nom sont faites à des bases de données et à des outils de traitements statistiques. Des logiciels plus spécifiques (que nous ne connaissons pas) sont également mentionnés (SIGR, plateforme GASP, logiciel MAP de l'INRETS-TRACE).

• Intéropérabilité en sortie

Les résultats sont-ils utilisés par un ou plusieurs autres modèles ? Quelles sont les conditions pour ce faire ? Ces questions font l'objet du champ 67 du questionnaire Inventur. Ce champ est globalement mal renseigné, et ceci dans tous les domaines (graphique ci-dessous). Une partie des réponses enregistrées sont d'ailleurs négatives.



État des réponses au champ 67

Le décompte des occurrences de mots ne suggère rien de précis. Dans le détail, l'analyse de contenu des réponses permet de mettre en évidence 12 modèles sur les 64 inventoriés dont les résultats sont effectivement susceptibles d'être utilisés en entrée d'un autre modèle.

L'encadré ci-dessous donne la liste de ces modèles (par ID) et les types d'interopérabilité possibles en sortie pour chacun d'eux.

Résultats de ID 3 :	données de trafic utilisées par un modèle de simulation de pollution.
Résultats de ID 14 :	peuvent être utilisés par un modèle de dispersion réactif (AZUR) permettant d'étudier les questions de chimie atmosphérique urbaine.
Résultats de ID 15 :	peuvent utiliser les résultats du modèle MERCURE.
Résultats de ID 17 :	peuvent être utilisés par un modèle de rivière (KALPLAN), sous forme d'hydrogrammes et de pollutogrammes injectés sur un bief de rivière.
Résultats de ID 27 et ID 28 :	plateforme GASP
Résultats de ID 31 :	utilisés dans le modèle stratégique (développé par le LET et le SEMALY) qui reprend l'estimation de la mobilité globale issue du module mobilité ; dans le modèle GROS QUINQUIN développé sur Paris.
Résultats de ID 43 :	les champs calculés peuvent servir de données d'entrée des modèles de qualité de l'air locale (échelle d'une rue). Les flux de polluants peuvent servir de données d'entrée des modèles meso-échelle (qualité de l'air à l'échelle régionale).
Résultats de ID 44 :	les flux verticaux au niveau des toits peuvent être utilisés comme données d'entrée de modèles meso ou sub-meso échelle.
Résultats de ID 45 :	utilisés dans le codes CHENSI (application sur l'agglomération nantaise)
Résultats de ID 46 :	les temps de parcours peuvent être utilisés comme entrée d'une autre modélisation de même type.
Résultats de ID 53 :	les résultats sont utilisés par le modèle d'optimisation en cours de construction.
Résultats de ID 58 :	les résultats de positionnement des sources et leurs caractéristiques photométriques sont récupérés en entrée dans Candela pour des calculs plus précis.

5.1.3 Conclusion

Les modèles urbains font appel à une large gamme de données de toutes natures. Ceux du pôle géographie utilisent principalement des données socioéconomiques, relatives à leurs échelles d'appréhension (la ville ou les systèmes de villes). Les modèles du pôle physique mettent en oeuvre des données décrivant les phénomènes en jeu (principalement climatiques) et des descripteurs géométrico-physiques des entités urbaines à l'échelle des fragments urbains.

De manière plus générale, les modèles du champ urbain font appel à 5 grands types de données : celles permettant la description spatiale ou morphologique des entités urbaines en 2D ou en 3D, les caractéristiques physiques, fonctionnelles ou comportementales des entités, objets ou individus modélisés, les données décrivant les phénomènes physiques naturels ou anthropiques pris en compte, des données socio-économiques générales ou encore des données spécifiques aux déplacements et aux transports. Toutes ces données peuvent être représentées en deux catégories : d'une part les descripteurs spécifiques des entités mises en jeu dans le modèle, et d'autre part les descripteurs contextuels décrivant l'environnement urbain dans lequel ces entités agissent. Elles conditionnent en partie la validité des résultats, d'autant plus lorsque les modèles sont sensibles à leur qualité ou à leur précision.

Certaines de ces données (une minorité sur l'ensemble des modèles), sont issues d'un ou plusieurs autres modèles qui font ainsi l'objet d'interopérabilité en entrée du modèle décrit. Les données géométriques sont généralement constituées à l'aide d'un progiciel dédié (modeleur géométrique). Des bases de données et des SIG sont également parfois utilisés.

Pour les autres données, trois modes d'acquisition sont mis en oeuvre : l'acquisition auprès d'un organisme prestataire extérieur pour les données existantes (INSEE, IGN, Météo-France, agences d'urbanisme, organismes spécialisés), l'acquisition sur le terrain pour les données inexistantes (par enquêtes, sondages, mesures et observations spécifiques), l'acquisition par d'autres moyens pour des données plus particulières (extraction manuelle à partir de documents divers, modélisation 3D « manuelle », digitalisation, etc.).

La diversité de ces données, leur quantité importante (non évaluée ici) ainsi que les difficultés manifestes des procédures d'acquisition (tant sur le plan matériel que du point de vue du coût), expliquent en grande partie les limites opérationnelles et la lourdeur des modèles analysés plus avant dans ce rapport.

Par ailleurs, l'analyse de la nature des résultats produits par les modèles urbains confirme l'intérêt de ces modèles pour les questions relatives aux transports et à leurs conséquences dans la ville, notamment au travers de la pollution atmosphérique (cf. chapitre 1). Ainsi, les modèles du pôle géographie produisent des résultats qui intéressent au premier chef les questions relatives aux déplacements ou au trafic de véhicules. Parallèlement, les modèles du pôle physique produisent des champs de concentration de polluants, notamment dans l'air. Les articulations entre les deux pôles semblent bien se situer dans le domaine des transports.

Quelle qu'en soit la nature, les résultats produits par les modèles font généralement l'objet de divers traitements, effectués de manière interne par le modèle lui-même, ou par différents outils extérieurs, notamment des logiciels du commerce. Dans ces traitements, les visualisations graphiques semblent privilégiées, par l'intermédiaire de cartographies, de graphes divers (courbes et profils), d'images de synthèses ou encore d'animations. Cette utilisation importante des potentialités d'expression graphique est sans doute relative à la forte composante spatiale des modèles urbains. Des traitements statistiques sont également utilisés.

Enfin, en matière d'interopérabilité, on note qu'une minorité des modèles décrits dans l'inventaire fournissent des résultats qui peuvent être utilisés par d'autres modèles du champ urbain.

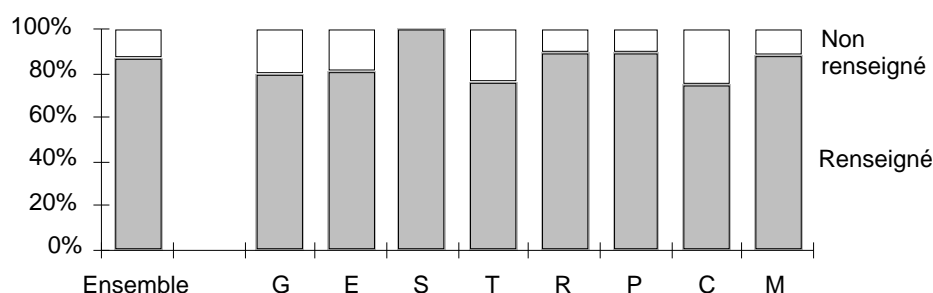
5.2 Concepts transversaux

Plusieurs champs du questionnaire Inventur devraient permettre de dégager ce que nous appelons ici des concepts transversaux de la modélisation du champ urbain. Hormis les questions relatives au contenu scientifique (hypothèses et méthodes) examinées plus loin, nous analysons ici deux aspects de la modélisation qui ont trait aux familles de modèles d'une part, et à la dichotomie entre modèles de connaissance et modèles de fonctionnement d'autre part.

5.2.1 Familles de modèles

• Bilan

La notion de famille de modèles fait l'objet du champ 44 de type texte du questionnaire Inventur. On pouvait supposer qu'à travers cette question, quelques ensembles cohérents de modèles se dégageraient par domaines. En réalité, la question est assez bien renseignée pour tous les domaines (graphique ci-dessous) mais les réponses semblent assez confuses.



État des réponses au champ 44

Pour ce qui concerne le décompte des occurrences des mots tous domaines confondus (liste ci-dessous), on ne remarque aucun terme clé, sinon la persistance des mots « réseau » et « transport », dans cette question comme dans d'autres :

- 5 simulation, reseau
- 4 base(s), physique(s), transport
- 3 geometriques, spatiale, outils, chimie, atmospherique, fluides, mecanique, modelisation
- 2 famille, tensions, flots, reseaux, model(s), generation, etapes, comportementale, morphodynamiques, radiosite, choix, assainissement, dispersion, dynamics, computational, codes, affectation, desagrege

L'analyse de contenu permet de dégager quelques constantes répertoriées dans l'encadré ci-dessous (nombre de citations et descriptions littérales des familles). Elle révèle surtout un grand nombre de « familles » représentées par un seul modèle. On note également que la définition de ce que pourrait être une famille de modèles varie d'un modèle à l'autre. Pour certains, les familles semblent déjà exister, être bien désignées et reconnues de manière académique (par exemple : Nouvelle Économie Urbaine). Pour d'autres, la famille est liée à un champ de recherche académique (CFD, Modélisation spatiale, Hydraulique urbaine, etc.), ou encore à une méthode particulière de modélisation ou de résolution dans un domaine particulier (Approche systémique, Systèmes multi-agents, Modèle gravitationnel, etc.).

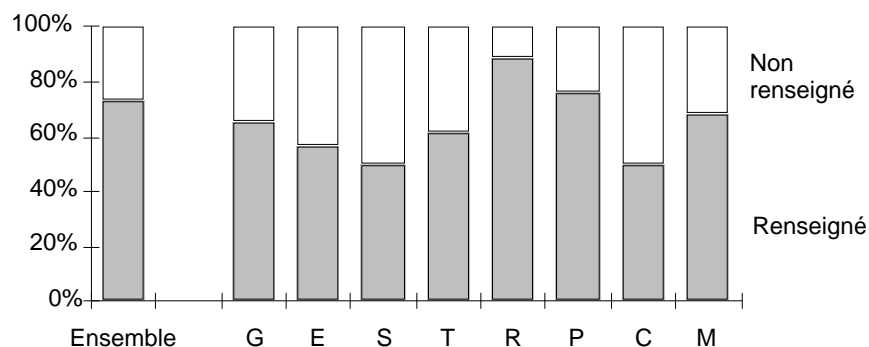
- 4 Codes CFD (Computational Fluid Dynamics) ou MFN (Mécanique des Fluides Numérique) / CFD (Computational Fluid Dynamics) adapté à la basse atmosphère / Modèle de mécanique des fluides, modèle atmosphérique / Codes de Mécanique des Fluides - Navier-Stokes
- 3 Modèles géométriques et graphiques / Modèles géométriques et de visibilité dans une scène / Modèles géométriques. Modèles stochastiques
- 2 Modèle de dispersion atmosphérique et de chimie atmosphérique / Modèles de transport/chimie-photochimie ou chimie/dispersion de l'ozone avec des grandeurs météo pré définies et imposées
- 2 Modèle de réseau d'assainissement
- 2 Modèle désagrégé d'affectation (stationnement) / Modèle désagrégé de choix discret
- 2 Approche systémique à la J. Forrester / Synergétique, systémique
- 2 Modèles à 4 étapes (génération, distribution spatiale, choix modal, affectation sur réseau) / Modèle de déplacement agrégé séquentiel à 4 étapes
- 2 Réseaux physiques avec flots et tensions
- 2 Modèle de radiativité
- 2 Modèles morphodynamiques
- 2 Outils de simulation comportementale
- 2 Cartographie urbaine, modèles de rugosité / SIG
- 1 Systèmes Multi-Agents
- 1 Modèles de rayons
- 1 Modèle transport/land-use
- 1 Modélisation des processus biologiques
- 1 Modèles de prévision de trafic
- 1 Jeux urbains
- 1 Modèles d'aide à la décision énergétique solaire
- 1 Modèles Eléments Finis
- 1 Modèles démographiques
- 1 Solutions heuristiques
- 1 Modèle de réseau de villes
- 1 Modèles d'auto-organisation de l'Ecole de Bruxelles.
- 1 Hydraulique urbaine
- 1 Modèle néo-classique de localisation : Nouvelle Economie Urbaine
- 1 Images composites dynamiques
- 1 Potentiel en Physique
- 1 Modèles de génération de flux de transport
- 1 Modélisation spatiale
- 1 Modèles méso-météorologiques
- 1 Microscale combined urban climatology models
- 1 Modèle descriptif (mode formalisé de mesure d'un caractère)
- 1 Modélisation d'ambiances urbaines
- 1 Modèles de simulation de la qualité en réseau d'eau potable
- 1 Modèle d'offre de transport basé sur la théorie des graphes
- 1 Ensemble d'outils pour la simulation de projets d'illumination
- 1 Famille des modèles basés sur l'exploitation d'une base de connaissance architecturale.
- 1 Gravitational Model, Economic basis theory
- 1 Modèle à base physique (voir plus haut la définition de cette famille)
- 1 Modèles de simulation de l'évolution spatiale du peuplement.

Ces différentes familles pourraient sans doute être mieux regroupées avec une bonne connaissance de la modélisation dans chaque domaine. Naturellement, nous ne pouvons prétendre ici à une telle connaissance.

• Autres modèles de la même famille

Cette question (champ 45) fait suite à la précédente dans le questionnaire Inventur. Elle est globalement bien renseignée, notamment dans les domaines du pôle physique (graphique page suivante). L'analyse du contenu des réponses met en évidence trois situations possibles des modèles relativement à leur famille potentielle :

- a) **il existe de nombreux autres modèles du même type** (11 situations de ce genre sont répertoriées dans l'inventaire) ;
- b) **quelques modèles connus sont comparables au modèle décrit** (28 situations répertoriées) ;
- c) **aucun modèle équivalent n'est connu** (2 situations répertoriées).



État des réponses au champ 45

L'encadré ci-dessous illustre ces différents cas. Rappelons que l'appréciation mentionnée est celle du rédacteur du questionnaire, celui-ci pouvant avoir une vue partielle, voire partielle, des travaux de modélisation existant dans son domaine.

a) Il existe de nombreux autres modèles du même type

- Dans le domaine de la synthèse d'image, de nombreux laboratoires (iMAGIS, irisa, LISSE, etc...) ont développé des modèles de radiance. De même un certain nombre de sociétés commercialisent de tels modèles (lightscape, radiance, etc) - 23
- Modèle d'acoustique physique, modèles psycho-sensoriels, modèles compositionnels formels - 26
- Nombreux modèles de simulation. Moins nombreux en optimisation. - 29
- Une pléthore (surtout à l'étranger) - 33
- Modèle de synthèse d'image et de visualisation graphique - 35
- Modèle de terrain et visibilité à l'échelle du territoire - 36
- Modèle de rendu en synthèse d'image - 37
- Modèles d'interaction spatiale. - 39
- Les modèles "à quatre étape" (génération, distribution, répartition modale, affectation) qui concernent généralement les transports de personnes. - 40
- Les modèles de l'IAURIF, de la RATP ou de la SNCF. Nombreux autres modèles de ce type à l'étranger ou en province. - 46
- Pour des réseaux électriques, des systèmes mécaniques, des réseaux thermiques... - 52

b) Un ou quelques modèles connus sont comparables

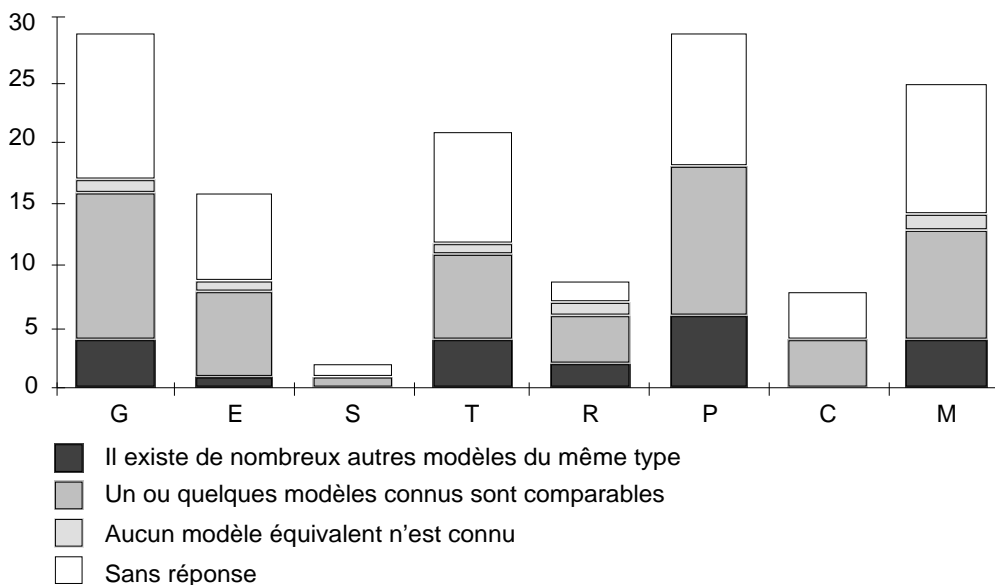
- MATISSE (trafic multimodal interurbain) - 2
- MEPLAN, TILT, CALUTAS - 3
- TRIPS, EMME/2 - 5
- Solène, SOMBRERO - 7
- Plaxis, Flac, Gefdyn - 8
- Codes Fluent, Phonics, Star-CD ... - 10
- HYDROWORKS, MOUSE, CANOE - 17
- FLUPOL, MOUSE, CANOE - 18
- En Ile de France, le modèle qui s'apparente le plus à ANTONIN est le modèle IMPACT de la RATP (Département du Développement). - 19
- Modèle de LOWRY et ses descendants - 21
- Le modèle de Harris et Wilson. - 22
- Visualisation des projets urbains dans leur environnement - Ecole d'Architecture de Nancy. Images composites pour la simulation urbaine - Institut de Géoarchitecture. - 34
- Analyse fractale (Pierre Frankhauser) - 41
- MESO-NHC (Météo-France, Laboratoire d'Aérodynamique). MERCURE (EDF) et AZUR (EDF, IFP, LISA). - 43
- PHOENICS - 44
- Flow field : MISKAM (J. Eichhorn, Univ. Mainz, Germany) - 47
- Le modèle fractal (plus précisément le calcul de la dimension fractale). - 48
- EPAnet (US Environmental Protection Agency) : Calcul hydraulique et simulation de la qualité.
- Piccolo (SAFEGE). - 53
- FLUENT, STARCD, FLOW3D, TascFlow, N3S - 54
- Modèle synergétique de la dynamique inter-régionale (applications au Canada, Allemagne, France, Suède, Israël, Italie). - 55
- RETIS (de la RATP). CRAPO (INRETS). MATISSE (INRETS) - 56

- LightScape, MicroLumen, Alladin, Helios. - 58
- REMUS du GAMSAU (UMR MAP N° 694). - 59
- WILSON, ALLEN - 60
- LOTOS, EMEP, CHIMERE (plus simplifié), AIRQUAL, EURAD, REM3. - 61
- Richard J. Morrill pour l'approche itérative de la modélisation (redéfinition des données de départ à partir des outputs de l'itération précédente). - 62
- En hydrologie en milieu naturel : les modèles SHE et TOPMODEL par exemple. - 63
- Le modèle de R. Morrill (publié dans Lund Studies of Geography, 1970) simule le développement d'un système de peuplement par un processus stochastique (méthode dite " de Monte Carlo ") de migration entre les lieux, selon un modèle gravitaire. Il ne concerne que la population et pas les fonctions. Peter Allen et Michèle Sanglier ont proposé un modèle dynamique de lieux centraux (Geographical Analysis, 1979) par équations différentielles, mais avec des hypothèses spatiales qui n'en font pas un modèle historique d'évolution du système des lieux centraux. - 64

c) Aucun modèle équivalent n'est connu

- Nous n'avons pas vu de modèle de ce même type (concurrents ?) mais des applications à base d'agents ont vu le jour dans le domaine du transport (gestion de flotte par exemple). - 16
- Les modèles de géométrie aléatoire ont été utilisés dans différents domaines : astrophysique, cristallographie, écologie, ... mais pas jusque là pour les réseaux techniques en général et les réseaux de télécommunications en particulier. - 42

Suivant ces données, il est possible de quantifier grossièrement la production de modèles dans les diverses thématiques du champ urbain. Le graphique ci-dessous répertorie ainsi les modèles des trois classes ci-dessus, en les situant (en nombre) dans chaque domaine. Rappelons qu'un même modèle peut appartenir à plusieurs domaines.



Types de familles de modèles suivant les domaines

Les domaines s'organisent de manière sensiblement équivalente : une minorité significative des modèles appartiennent à une famille dans laquelle il existe de nombreuses autres propositions équivalentes (classe a) ; la majorité des modèles (40 % environ) s'inscrivent dans une famille comprenant quelques autres modèles comparables (classe b) ; une très faible minorité sont les seuls représentants de leur famille (classe c), tandis que les autres modèles (environ 40 % de chaque domaine) ne se situent pas au sein d'une famille. Remarquons que l'appartenance à l'une de ces catégories est fortement liée à l'appréciation du rédacteur du questionnaire sur l'originalité du modèle qu'il décrit, le rédacteur étant le plus souvent l'auteur du modèle.

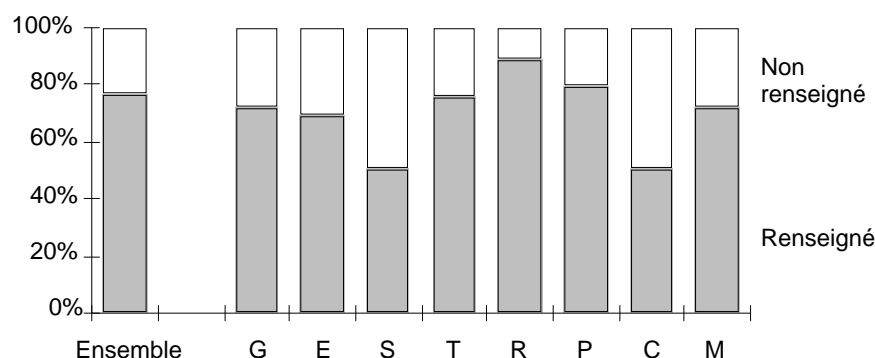
A partir de ces constats, il est également possible, de manière incidente, de dresser la liste des modèles explicitement cités dans les réponses au champ précédent. Nous obtenons alors les 50 références suivantes (classées par ordre alphabétique) :

AIRQUAL	HYDROWORKS	MOUSE
ALLADIN	IMPACT	N3S
AZUR	LIGHTSCAPE	PHOENICS
CALUTAS	LOTOS	PICCOLO
CANOE	MATISSE	PLAXIS
CHIMERE	MEPLAN	RADIANCE
CRAPO	MERCURE	REM3
EMEP	MESO-NHC	REMUS
EMME/2	MICROLUMEN	RETIS
EPA-NET	MISKAM	SHE
EURAD		SOLENE
FLAC	Modèle de Harris et Wilson	SOMBRERO
FLOW3D	Modèle de Lowry	STAR-CD
FLUENT	Modèle de Peter Allen et Michèle Sanglier	TASCFLOW
FLUPOL	Modèle de Richard J. Morrill	TILT
GEFDYN	Modèle fractal	TOPMODEL
HELIOS	Modèle synergétique de la dynamique inter-régionale	TRIPS

Parmi ces modèles, 6 sont génériques (de type : « modèle de ... ») et 44 autres semblent être des outils logiciels répertoriés et diffusés (sans quoi leur mention dans les réponses serait peu pertinente). Parmi ces 44 modèles, 7 sont d'ores et déjà répertoriés dans Inventur (AZUR, FLUPOL, HYDROWORKS, MERCURE, N3S, PHOENICS, SOLENE). Il existerait donc au moins 37 modèles à ajouter dans notre inventaire, ce qui porterait l'effectif général des modèles du champ urbain à plus de 100.

• Spécificité du modèle au sein de sa famille

Ce point fait l'objet du champ 46 du questionnaire Inventur, globalement bien renseigné (graphique ci-dessous).



État des réponses au champ 46

Le décompte des occurrences de mots ne fournit pas de résultat probant. L'analyse du contenu des réponses est plus intéressante. Elle permet de dégager trois types d'originalité et de spécificité des modèles, à savoir : a) **le modèle est original parce que bien adapté aux situations urbaines traitées** (géométries, échelles, méthodes, etc.) ; b) **les phénomènes modélisés, l'approche retenue, les principes de modélisation ou de résolution sont originaux** ; c) **le modèle intègre des fonctionnalités utiles en pratique**. L'encadré ci-dessous illustre ces différents cas.

a) Le modèle est bien adapté aux situations urbaines traitées (géométries, échelles, méthodes, etc.)

- Orienté géotechnique avec au menu de nombreuses modèles de comportement - 8
- Il est appliqué aux transports à l'échelle d'une région urbaine - 9
- Utilisation d'une discrétisation de type éléments finis sur un maillage non-structure bien adapté aux géométries complexes - 10
- Sa spécificité tient surtout à la taille de l'agglomération francilienne et à l'importance de l'offre en transports collectifs qui nécessite une modélisation fine des différentes alternatives de transports publics. - 19
- Le réalisme photométrique et colorimétrique. Les propriétés physiques des matériaux (spectre de réflectance) et des sources (indicatrice, spectre d'émission) sont pris en compte. - 23
- Représentation de la géométrie, de la topologie et de la sémantique du réseau routier urbain - 27
- Représentation du comportement humain - 28
- Les sous-modèles internes ont été spécifiquement développés pour les petites échelles méso urbaines sur des orographies complexes. - 43
- Adaptation à la basse atmosphère urbaine : équation pour la température potentielle, modèle de turbulence induite par les véhicules, couplage dynamique-thermique (force d'Archimède), équation de transport-diffusion de polluants. - 44
- Le rapport finesse du réseau / zone d'étude. Ce modèle opère sur un grand nombre de zones et sur réseau décrit très finement, pour une région aussi importante que l'IdF. - 46
- Application à des entités "villes". - 55
- Le modèle produit des volumétries plausibles à partir de simples documents bidimensionnels (plans de cadastre), de règlements d'urbanisme s'appliquant au bâti par rapport à sa limite parcellaire, et de connaissances techniques relatives aux matériaux et aux mises en œuvre. - 59
- Résolution verticale fine. Description de panaches à une échelle inférieure à celle de la maille du modèle. Possibilité de grilles imbriquées. - 61
- Définition du système de transport à partir de la distance-temps, mesurée selon la qualité de chaque infrastructure (largeur, sinuosité, pentes...). Prise en compte en dynamique des interactions entre le système de transport et les systèmes de villes. - 62
- Le modèle est appliqué au milieu urbain, ce qui est rare pour ce type de modèle. - 63

b) Les phénomènes modélisés, l'approche retenue, les principes de modélisation ou de résolution sont originaux

- Stationnement - 2
- Modélisation basée sur des observations biologiques qui assurent la réalité botanique des végétaux simulés - 4
- Modèle séquentiel à 4 étapes - 5
- Simule un RESEAU de villes - 6
- Il utilise la programmation orientée objet pour traiter chaque ménage de façon distincte - 21
- Système d'équations différentielles non linéaires. - 22
- Soit ces modèles n'implémentent pas le principe d'action-réaction soit il ne l'implémentent pas à un niveau suffisamment élémentaire (les modèles à agents quand ils sont réactifs mettent la réactivité à un niveau macroscopique comme le niveau plutôt "cognitif"). - 25
- Le programme est l'un des rares (le seul ?) capable de traiter correctement (en commande optimale) des réseaux incluant une ou deux dizaines de réservoirs. Les travaux sur le diagnostic et la détection de fuites semblent également originaux. - 29
- Pas à pas, macro-spatial, approche par chaînes de déplacements - 33
- Analyse géométrique de la visibilité d'objets dans une vue et reconstitution géométrique en 3D des éléments visibles - 35
- Produit dérivé d'un modèle d'ensoleillement (SOLENE) qui engendre des descripteurs caractérisant la visibilité - 36
- S'appuie sur un modèle de ciel à la fois géométrique et lumineux. Résout de manière itérative les inter réflexions - 37
- Ce modèle ne tente pas de reconstituer une matrice origines-destinations de véhicules entre zones, du fait de la complexité de l'organisation en tournées. Ce modèle produit une mesure de l'encombrement de la voirie par les véhicules en stationnement pour livraison. - 40
- Invariant à la translation et rotation des formes. Enregistre le facteur d'échelle. Réversible. - 41
- Vis à vis de la géométrie aléatoire : d'abord le domaine d'application, puis un certain nombre de résultats géométriques originaux (processus spatiaux non homogènes, optimisation stochastique, caractéristiques géométriques de superposition de zonages sur un même territoire, ...). Vis à vis des modèles technico-économique : la possibilité de modéliser une très grande variabilité des phénomènes avec très peu de paramètres grâce au caractère stochastique du modèle. - 42
- Le modèle intègre des relations semi-empiriques déduites d'expérimentations et de simulations. - 45
- Equations d'états non-linéaires - 51
- Les flots et les tensions sont des variables aléatoires. - 52
- Contrairement aux modèles cités ci-dessus, ce modèle n'utilise pas de discrétisation en espace le long des conduites et n'impose pas le choix de conditions initiales sur les concentrations en désinfectant - 53
- Résolution volumes finis, maillage structuré. - 54

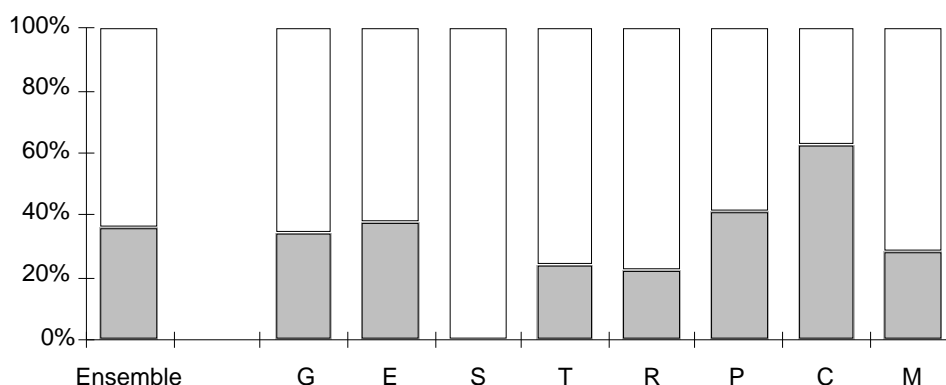
- Multi Agents. Basé sur des contraintes et différents niveaux d'analyses. - 57
- Positionnement des sources lumineuses avec possibilités de lien avec un élément architectural 3D. - 58
- C'est un modèle qui traite à la fois de la croissance des populations urbaines et de leur spécialisation fonctionnelle, ainsi que de la hiérarchisation des villes. Le modèle a aussi l'originalité d'employer la méthode des systèmes multi-agents, beaucoup plus souple que les équations différentielles pour la modélisation des interactions spatiales (ainsi, il permet de faire varier la portée des interactions des villes en fonction de leur taille, de leur spécialisation fonctionnelle, et au cours du temps). - 64

c) Le modèle intègre des fonctionnalités utiles en pratique.

- Le développement d'interfaces visuelles pour l'explicitation des phénomènes étudiés et des résultats obtenus. - 7
- Moteur hydraulique simple. Atout pédagogique - 17
- Modèle mécaniste pour l'hydraulique, conceptuel pour la pollution. Module supplémentaire : temps réel, cartographie. Interface graphique poussé (données, résultats) - 18
- Le modèle sacrifie le détail architectural au profit de la vision interactive du projet simplifié dans le site réel. - 34
- Orientation vers l'aide à la décision pour l'aménagement du territoire. D'où découle la possibilité de simuler l'impact de projets de modification de l'offre de transport. - 56

• Antécédents

Le modèle décrit est-il lié directement à un ou plusieurs autres modèles développés antérieurement ? Ce point fait l'objet du champ 47 du questionnaire. Les réponses ont été présentées plus haut dans ce rapport, dans l'analyse sur l'évolution chronologique des modèles (cf. § 2.2.1). Rappelons que sur l'ensemble de l'inventaire, 23 modèles (environ 35 %) ont été dérivés à partir d'un ou plusieurs autres modèles antérieurs (ID 3, 7, 8, 9, 11, 14, 15, 18, 19, 21, 22, 30, 34, 35, 36, 37, 39, 42, 43, 56, 58, 61, 62). Ces modèles se répartissent dans l'ensemble des domaines (graphique ci-dessous). On note cependant que la part de modèles dérivés par rapport à l'ensemble est plutôt plus importante dans le domaine des risques, plutôt plus faible dans ceux des transports et des réseaux.



Part des modèles dérivés par domaine

• Filiation

En relation à la question précédente, on peut se demander si les modèles inventoriés ont permis d'engendrer d'autres modèles. Ce point fait l'objet du champ 48 du questionnaire Inventur, globalement moyennement renseigné, plutôt mieux dans le pôle physique et plutôt moins bien dans le pôle géographie.

Sur les 40 réponses totales, 10 sont négatives (il n'existe pas de filiation au modèle décrit) et 4 sont de type « pas encore » ou « en cours » (des filiations sont prévues à court ou moyen terme). Parmi les 26 réponses effectives, 4 répondent en termes d'application du

modèle décrit plutôt que de réelle filiation, tandis que 3 précisent les fonctionnalités des futures versions du modèle, que l'on ne peut considérer comme des modèles affiliés. Pour les autres, on note la liste de réponses suivantes :

- *Modèle(s) dérivé(s) de SIMRES* : SIMVIL : simulation des impacts de grands événements urbains
- *Modèle(s) dérivé(s) de TOWNSCOPE* : Modèles d'analyse paysagère, basés sur le calcul d'intervisibilités. Gisement énergétique solaire en site vierge
- *Modèle(s) dérivé(s) de FLUPOL* : HYDROWORKS DM
- *Modèle(s) dérivé(s) de SIMURB* : Modèle NEGOCE destiné à être inclus dans SIMURB
- *Modèle(s) dérivé(s) du Modèle intra-urbain de Peter Allen* : Modèle des dynamiques interrégionales (exemple d'application au Sénégal)
- *Modèle(s) dérivé(s) de OPTREZODO* : Des méthodes très performantes de résolution des équations d'équilibre sont devenues opérationnelles dans le logiciel d'une société de service active dans ce domaine. Les mêmes méthodes sont applicables aux réseaux de gaz (en modélisation incompressible).
- *Modèle(s) dérivé(s) du Modèle stratégique de déplacements de l'agglomération lyonnaise* : Modèle stratégique de déplacements de la région urbaine de Grenoble. Modèle stratégique de déplacements de l'agglomération de Bordeaux
- *Modèle(s) dérivé(s) de IDOS* : Le présent modèle fait partie d'un modèle plus large (...)
- *Modèle(s) dérivé(s) de SOLENE - SIMULATION SOLAIRE* : Modèle de visibilité. Modèle de simulation de la lumière naturelle
- *Modèle(s) dérivé(s) de SOLENE - SIMULATION DE L'ACCESSIBILITE VISUELLE* : Des modèles de type déclaratif pour la conception de scènes urbaines par contraintes de visibilité
- *Modèle(s) dérivé(s) de SOLENE - SIMULATION DE L'ECLAIREMENT NATUREL* : Des modèles de simulation du rayonnement thermique
- *Modèle(s) dérivé(s) du modèle de Géométrie aléatoire* : En économie spatiale en général : une début de modélisation de la répartition spatiale des activités économiques
- *Modèle(s) dérivé(s) de SUBMESO* : Certains modules développés pour SUBMESO peuvent fonctionner de manière indépendante : modèle de sol SM2, modèle de chimie-transport TRANSCHEM, modèle de turbulence d'ordre 1,5 de Abart et Sini, 1998, mailleur VLx (Société RD Consulting)
- *Modèle(s) dérivé(s) de MAIZIA* : Le modèle de l'intégration morphologique. Nous avons proposer un protocole permettant de mesurer le degré d'intégration d'un objet dans un système ou, à l'inverse, de produire un objet " intégré " à partir de donnée sur le contexte (encore à l'étude)
- *Modèle(s) dérivé(s) de PORTEAU-ZOMAYET* : PORTEAU-QUALITE pour le diagnostic de la qualité de l'eau pour un réseau de distribution d'eau et PORTEAU-CALAGE pour l'identification des rugosités de la demande.
- *Modèle(s) dérivé(s) de EQUARESEAU* : Un modèle d'optimisation des concentrations devant directement utiliser les résultats fournis par le programme de calcul est en cours d'élaboration.
- *Modèle(s) dérivé(s) de STRATEGIE* : Un SIG anglais (LAMPS 2) de Laser-Scan utilise actuellement les concepts de STRATEGIE pour créer un nouveau module de généralisation de données géographiques dans le cadre d'un projet ESPRIT dont fait partie l'IGN.
- *Modèle(s) dérivé(s) de GARIN-LOWRY* : WILSON ALLEN

Sur les 64 modèles inventoriés, 18 modèles présentent donc des applications dérivées. On note cependant que ces filiations sont généralement peu explicites dans les réponses. 13 modèles (ou assimilés) sont effectivement désignés, à savoir :

- SIMVIL
- HYDROWORKS
- NEGOCE
- Modèle des dynamiques interrégionales
- Modèle stratégique de déplacements de la région urbaine de Grenoble.
- Modèle stratégique de déplacements de l'agglomération de Bordeaux
- Modèle de sol SM2
- modèle de chimie-transport TRANSCHEM
- modèle de turbulence d'ordre 1,5 de Abart et Sini
- mailleur VLx
- PORTEAU-QUALITE
- PORTEAU-CALAGE
- WILSON ALLEN

Parmi ces modèles, trois sont déjà présents dans l'inventaire (HYDROWORKS, NEGOCE et WILSON ALLEN).

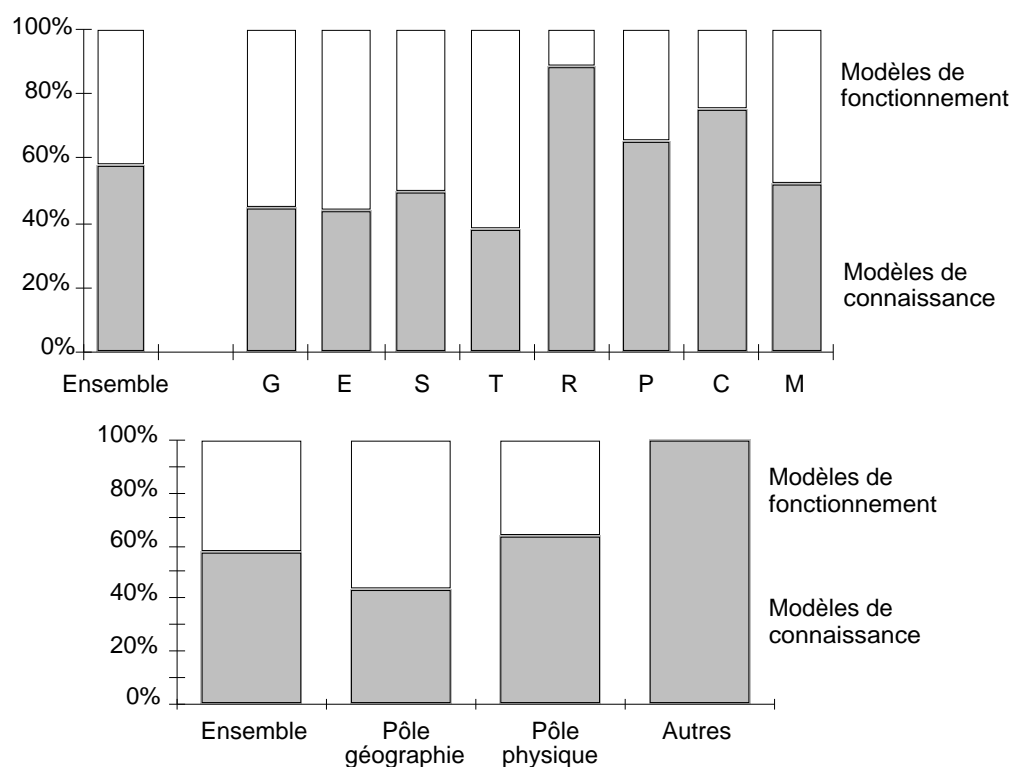
5.2.2 Modèles de connaissance et modèles de fonctionnement

Parmi les nombreuses qualifications de modèles proposées dans la littérature, nous avons retenue la distinction entre modèles dits de connaissance et modèles dits de fonctionnement. Les premiers cherchent à imiter le plus fidèlement les mécanismes élémentaires expliquant le fonctionnement de l'objet modélisé ; ce sont plutôt des modèles descriptifs ou explicatifs. Les modèles de fonctionnement se contentent quant à eux de reproduire les relations constatées entre les entrées et les sorties de l'objet modélisé comme un système ; ce sont plutôt des modèles prédictifs ou prospectifs.

• Bilan

Cette distinction fait l'objet du champ 33 du questionnaire Inventur. Celui-ci est complété par un champ de type texte (34) proposant au rédacteur du questionnaire de préciser son point de vue sur cette dualité. Ces questions devraient renseigner en partie sur les méthodes de modélisation : les auteurs cherchent-ils avant tout à représenter les phénomènes du champ urbain à partir des connaissances qu'ils en ont, ou bien se satisfont-ils d'un système analogique reproduisant le fonctionnement de l'objet modélisé ?

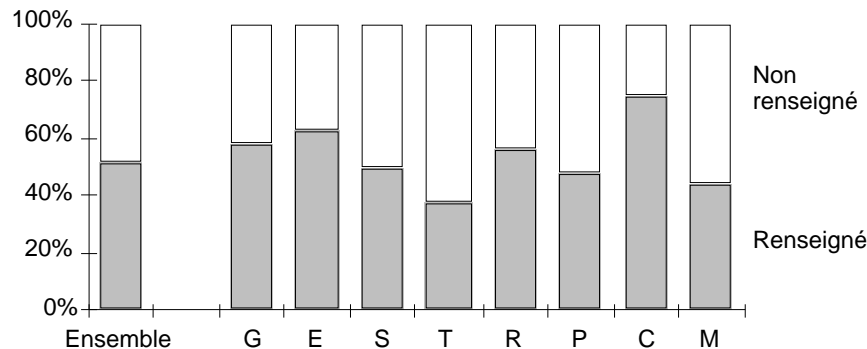
Les réponses au champ 33 sont synthétisées dans les graphiques ci-dessous. Sur l'ensemble des modèles, on observe un certain équilibre des catégories, avec un légère prépondérance des modèles dits de connaissance (37 sur 64, soit 57 %). Par domaines, on remarque une différence entre les modèles du pôle géographie, dits en majorité de fonctionnement, et ceux du pôle physique, en majorité dits de connaissance. Ce résultat conduit à penser que la distinction proposée n'est pas sans pertinence, puisqu'il semble vrai qu'un modèle de connaissance est plus facile à construire dans les domaines des sciences exactes (la connaissance des phénomènes y semble plus univoque et mieux formalisée), que dans ceux des sciences sociales où la connaissance relève parfois de l'hypothèse permanente.



État des réponses au champ 33, par domaines et par pôles

• Précisions des auteurs

La distinction entre modèles de connaissance et modèles de fonctionnement n'est pas toujours adaptée aux situations particulières ou encore aux concepts propres aux différents domaines de modélisation. L'analyse des réponses au champ 34 du questionnaire Inventur permet de préciser le point de vue des auteurs à ce sujet. Le champ est renseigné par la moitié des auteurs environ (graphique ci-dessous), plutôt plus dans les domaines de risques, de l'économie et de la géographie, plutôt moins dans les domaines des transports ou de la morphologie. Sous toute réserve, la distinction entre modèles de connaissance et modèles de fonctionnement semblerait donc mieux acceptée dans ces deux domaines puisque le besoin de justification est plus faible.



État des réponses au champ 34

Dans le détail, le décompte des occurrences de mots, tous domaines confondus, donne la liste ci-dessous :

- 10 connaissance(s)
- 7 fonctionnement
- 6 temps, physique(s), comportement(s), transport(s)
- 5 processus, base(s)
- 4 simulation, outil, partie, type
- 3 utilise(s), spatiale(s), demarche, systeme(s), analyse, modelisation, repose, decision(s), surfaces, issus, polluants, hydraulique(s), flux, mobiles, phenomenes, mise, equation(s), niveau, mecanismes, different(s), permet, compte, technique(s)

Ces résultats semblent difficiles à interpréter. Ils montrent que les auteurs répondent sur le fond, en distinguant pour chaque modèle les éléments susceptibles de justifier la distinction entre modèles de fonctionnement et modèles de connaissance.

Une analyse de contenu permet de cerner trois types de réponses : a) celles expliquant pourquoi **le modèle peut présenter les deux aspects**, nuancant ainsi le choix de la question précédente (8 cas recensés) ; b) celles expliquant pourquoi **la distinction** entre modèle de connaissance et modèle de fonctionnement **ne convient pas au modèle** décrit, avec éventuellement la proposition d'une qualification mieux adaptée (6 cas) ; c) celles **justifiant sur le fond** le choix effectué (17 cas).

L'encadré ci-après illustre ces trois catégories.

a) Le modèle présente les deux aspects

- Modèle de connaissance pour la partie transport. Modèle de fonctionnement pour la partie usage du sol - 3
- C'est plus un modèle prédictif, mais il permet également de comprendre les différents mécanismes intervenant au sein d'un massif de sol sollicité naturellement ou artificiellement - 8
- Les deux points de vue correspondent ici aux objectifs du modèle. - 22

- Les deux à la fois, il s'agit d'utiliser le modèle physique comme un outil de re-construction d'effets sensibles et comme un outil de validation de connaissances psycho-cognitives. - 25, 26
- Le modèle de connaissance (modèle détaillé) peut servir aux fins de simulation pour valider les décisions sorties du modèle de fonctionnement - 29
- Le modèle peut fonctionner suivant les deux logiques. - 55
- Both because it can serve theoretically to know effects of distance, or underline other factors ; if the model is well calibrated it can serve to predict the consequences of the apparition or the disparition of a " basic " activity. - 60

b) La distinction ne convient pas au modèle, une autre qualification est éventuellement mieux adaptée

- Il est difficile de répondre à cette question : notre but est de définir de meilleures techniques de visualisation (i.e. plus rapides, plus efficaces), prenant en compte des informations de type morphologiques, soit obtenues par ailleurs, soit extraites des données de départ. - 1
- FLUPOL est un modèle de type conceptuel qui évalue les flux hydrauliques et polluants, issus du ruissellement des surfaces urbaines par temps de pluie en tenant compte des rejets observables par temps sec. - 17
- HYDROWORKS est un modèle, de type mécaniste pour l'hydraulique et conceptuel pour la pollution, qui évalue les flux hydrauliques et polluants, par temps sec ou issus du ruissellement des surfaces urbaines par temps de pluie en tenant compte des rejets observables par temps sec. - 18
- Modèle de simulation. - 31
- ATTENTION : J'ai eu des difficultés à décider entre les deux options. Le modèle présenté ici cherche à représenter certains des processus de bases qui expliquent l'évolution temporelle des polluants de l'air. Il me semble que cela correspond à rechercher "à imiter les mécanismes élémentaires expliquant le fonctionnement de l'objet modéliser". En même temps, on utilise ce modèle également à des fins prédictives ou prospectives. Dites-nous ce que vous pensez. - 61
- Dans notre domaine, l'hydrologie, on qualifie ce type de modèle de 'à base physique' (il utilise les lois et processus physiques pour représenter le comportement d'un système). Par contre, on ne le qualifie pas de modèle 'de connaissance', car un modèle ne peut apporter directement des connaissances, mais plutôt de modèle 'cognitif'. - 63

c) Le choix peut être justifié par les éléments suivants

- Le modèle ne cherche pas à reconstituer toute la complexité des comportements, mais à les simplifier selon des dimensions dont l'évolution est prévisible à long terme et qui "résumant" les autres dimensions (par exemple le niveau d'étude, les taux d'activité, ... sont pris en charge par la génération) ; c'est pourquoi nous nous appuyons sur la démographie - 9
- Le modèle résout les équations fondamentales de la Mécanique des Fluides (conservation de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie...) et permet leur couplage - 10
- Modèle basé sur la mise en équation des phénomènes physiques avec une partie de paramétrisations - 14, 15
- Le modèle met en action des mobiles. Chacun d'eux agit suivant des règles (ou comportements) acquises grâce à des observations. Les mobiles simulés restituent donc des actions issues de la connaissance que l'on a des comportements des mobiles réels. Il s'agit donc d'une imitation. - 16
- L'intérêt principal du modèle est de simuler et d'évaluer ainsi les conséquences de modification du contexte local. - 32
- Le modèle renseigne objectivement sur l'interaction volumique des espaces projetés et existants. Il est une étape dans le processus de simulation, lequel est lié à la hiérarchie des décisions. - 34
- Le modèle repose sur une modélisation précise de la géométrie solaire - 35
- Le modèle repose sur une analyse des visibilité dans un champ de vision donné - 36
- Le modèle repose sur une modélisation de la lumière émise par la voûte du ciel - 37
- La distribution urbaine est un peu le parent pauvre de la réflexion sur le système de transport urbain : alors qu'on estime à environ 30% des véhicules*km (équivalents voitures particulières), la part de celle-ci dans l'ensemble des véhicules*km parcourus dans une agglomération, rares sont les travaux de recherche réalisés sur cet aspect des déplacements urbains. Aussi, un programme d'enquêtes ambitieux a été lancé par le ministère des transports afin de mieux connaître le fonctionnement des transports de marchandises en ville. La démarche de modélisation entreprise sur la base de ces enquêtes est donc en premier lieu une démarche de connaissance visant à reproduire les comportements des acteurs et à expliquer les relations entre ces comportements et les flux de transport générés. C'est à ce titre que FRETURB est conçu comme un modèle de fonctionnement. - 40
- Modèle de description des formes spatiales. - 41
- L'originalité du modèle tient à la mise en évidence formelle des liens entre extension spatiale du réseau, charge sur le réseau et choix d'architecture techniques. Ces liens peuvent ensuite être utilisés pour améliorer l'aide à la décision technique, ou pour rendre plus pertinents les exercices de benchmarks entre réseaux. - 42
- The objective is to analyse the interactions between different artificial and natural surfaces and the possibilities to optimize urban planning concerning climate - 47
- Il s'agit d'un modèle de fonctionnement qui permet de prévoir, à partir de prévisions météorologiques, la répartition spatiale attendue d'une pollution ainsi que son niveau global. - 49

- La démarche ne tend pas vers l'explication du fonctionnement des réseaux de transport mais vers la production d'un modèle qui permette la simulation. - 56
- La généralisation requiert une identification des phénomènes géographiques à différents niveaux d'analyse et l'existence de connaissances procédurales. L'objectif du processus est une modification de la représentation de cet espace. - 57
- Les processus introduits dans le modèle sont à méso-échelle (concurrences entre les villes, croissances différentielles et spécialisations), issus de la connaissance abstraite des mécanismes statistiques observés à ce niveau d'agrégation lors de l'étude des transformations historiques des systèmes de villes. - 64

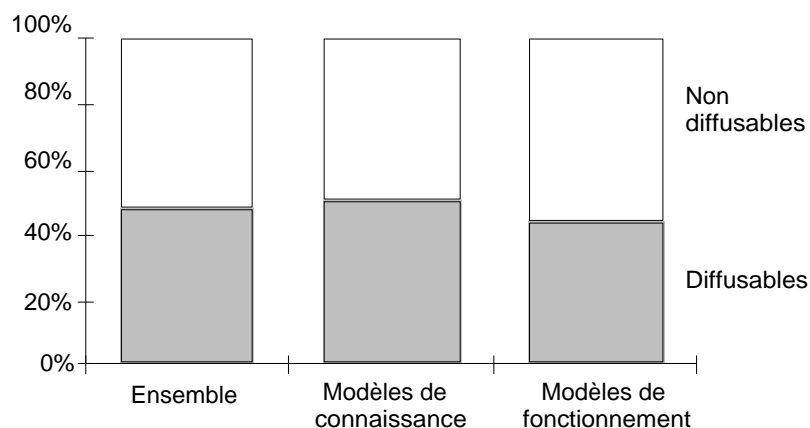
On note que les modèles présentant les deux aspects (catégorie a : ID 3, 8, 22, 25, 26, 29, 55, 60) se répartissent à raison de 5 sur 8 dans le pôle géographie et de 3 sur 8 dans le pôle physique. A l'inverse, ceux pour lesquels la distinction n'est pas adaptée (catégorie b : ID 1, 17, 18, 31, 61, 63) sont majoritairement issus du pôle physique (4 modèles sur 6).

La somme des deux catégories a) et b) conduit à un équilibre parfait entre les pôles (7 modèles dans chacun d'eux), si bien que lorsque l'on effectue le comptage des réponses au champ 33 (choix unique) pour les seuls modèles effectivement concernés (l'ensemble des modèles moins ceux référencés ci-dessus), on obtient exactement la même répartition que pour l'ensemble, à savoir : 58 % de modèles de connaissance et 42 % de modèles de fonctionnement.

Les conclusions précédentes ne sont donc pas à remettre en question par la précisions mentionnées ci-dessus par les auteurs.

• **Connaissance / fonctionnement et diffusabilité**

Existe-t-il une relation entre le type du modèle et sa diffusabilité (existence sous la forme d'un logiciel diffusable) ? Les résultats de ce croisement (graphique ci-dessous) ne montrent pas de corrélation significative entre ces deux caractéristiques. Ainsi, les choix de modélisation ne semblent pas être une entrave à la diffusion du modèle.

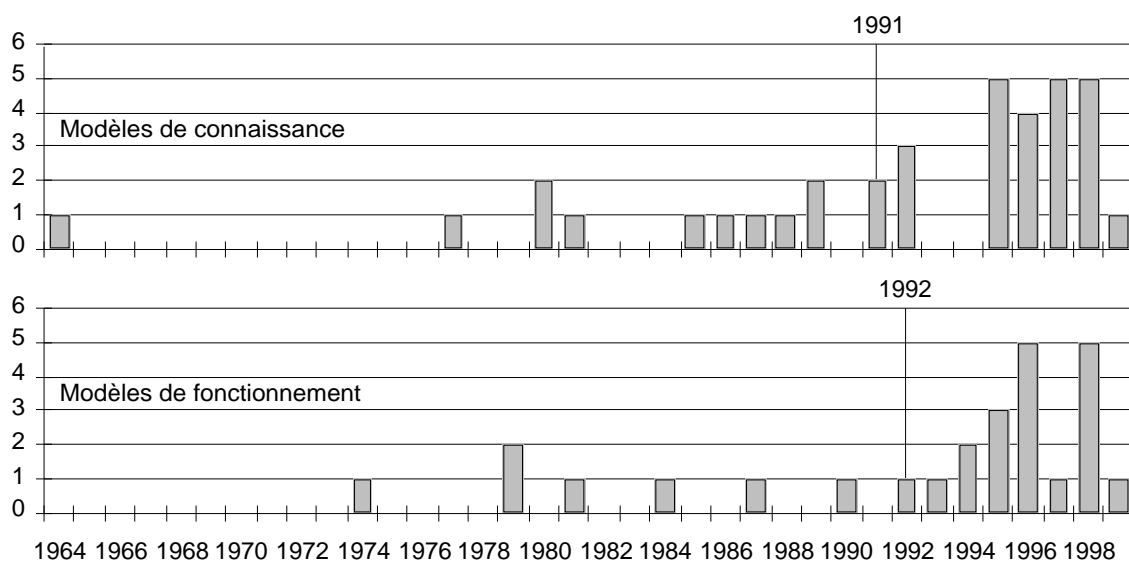


Relation entre types de modèles et diffusabilité

• **Connaissance / fonctionnement et âge des modèles**

Il ne semble pas exister non plus de relation entre le type du modèle et son âge. Ainsi, la date moyenne de création des modèles de connaissance se situe en 1991 (conformément à la moyenne de l'ensemble), tandis que celle des modèles de fonctionnement se situe en 1992. Ces derniers sont légèrement plus jeunes, sans cependant que l'écart apparaisse significatif (graphiques page suivante). Par ailleurs, l'étalement temporel est équivalent pour les deux

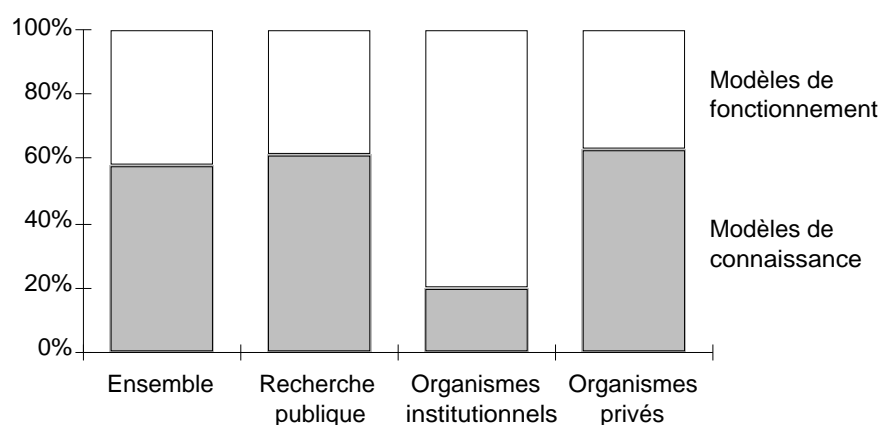
types et la progression récente de la production de modèles se manifeste également dans les deux catégories.



Modèles de connaissance et modèles de fonctionnement : évolution chronologique en nombre d'unités par année

• Connaissance / fonctionnement et origine des modèles

Curieusement, il apparaît que les modèles issus d'organismes institutionnels sont très majoritairement de type « modèles de fonctionnement », tandis que modèles d'autres origines se répartissent selon la moyenne (graphique ci-dessous). Ce résultat semble difficile à interpréter.



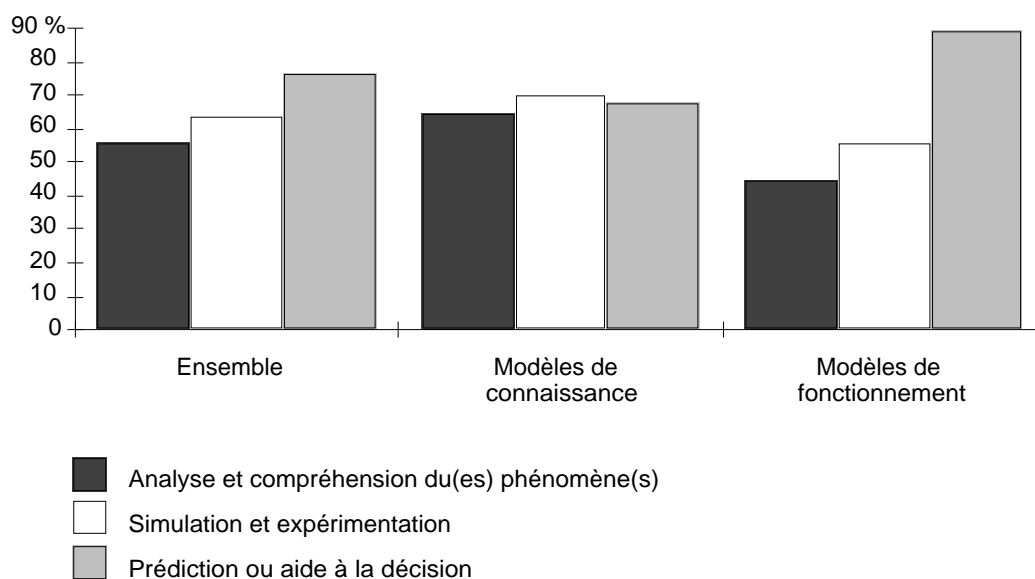
Type et origine des modèles

• Connaissance / fonctionnement et objectifs de la modélisation

Le type des modèles peut être en partie justifié par les objectifs assignés à la modélisation. On peut par exemple supposer qu'un modèle de fonctionnement sera jugé plus efficace pour l'aide à la décision qu'un modèle de connaissance, sans doute plus précis mais aussi généralement plus lourd. A l'inverse, il est probable qu'un objectif de compréhension des

phénomènes en jeu appellera le développement d'un modèle de connaissance, dont les paramètres sont plus faciles à manipuler, qu'un modèle de fonctionnement plus ou moins arbitraire.

Ces hypothèses sont vérifiées dans l'inventaire. Ainsi, on constate (graphique ci-dessous) que les modèles de fonctionnement sont majoritairement dédiés à la prédiction et à l'aide à la décision, même si certains d'entre eux sont également utilisés à des fins de compréhension des phénomènes. Parallèlement, ce dernier objectif est bien couvert par les modèles de connaissance, qui présentent par ailleurs un remarquable équilibre entre les trois objectifs proposés, notamment si on les compare à l'ensemble.



Type et objectifs des modèles

Ainsi, on est conduit à penser que le choix de développement d'un modèle de connaissance ou de fonctionnement, quelles que soient les ambiguïtés attachées à ces désignations, s'effectue en partie en regard des objectifs assignés au modèle et fait partie des éléments d'une « stratégie » de modélisation.

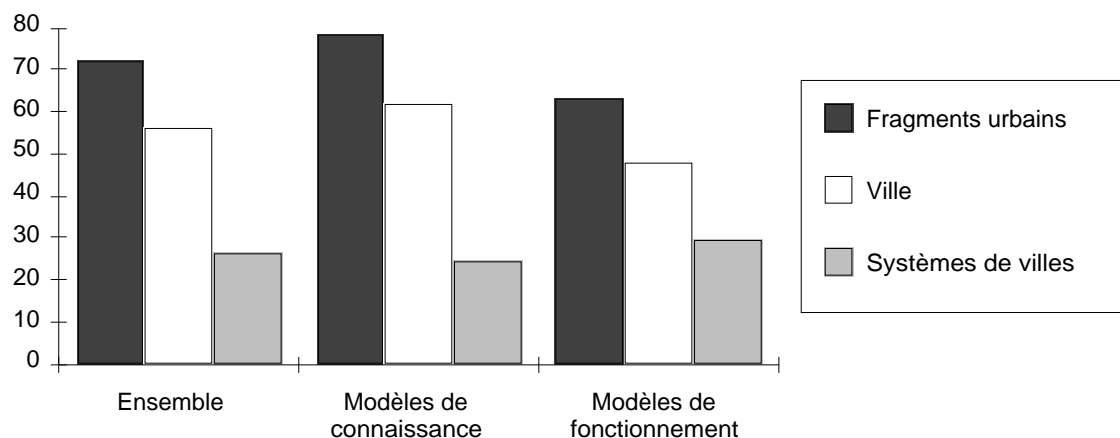
• **Connaissance / fonctionnement et échelles d'appréhension du champ urbain**

Les modèles de connaissance ou de fonctionnement sont-ils, par leur nature, mieux adaptés à certaines échelles urbaines ? La plus forte présence des modèles de fonctionnement dans le pôle géographie pourrait laisser penser que ceux-ci appréhendent majoritairement le champ urbain aux échelles de la ville et des systèmes de villes. A l'inverse, les modèles de connaissance seraient plus orientés vers les échelles des fragments urbains, conformément à la prédominance de ces échelles dans le pôle physique.

Les décomptes des modèles par type et suivant les échelles prises en compte (graphique ci-après, page suivante) ne confirment pas ces hypothèses. Au contraire, on observe une remarquable homogénéité des distributions d'échelles au sein des deux groupes de modèles, tant en hiérarchie qu'en parts relatives. En particulier, les deux groupes sont parfaitement analogues à la distribution de l'ensemble.

Ces résultats sont peu conformes à l'intuition si l'on se réfère à la répartition des types de modèles dans les pôles d'une part, et aux préférences relatives de chaque pôle pour ce qui concerne les échelles urbaines d'autre part (cf. § 2.3.1). On est alors conduit à penser que les échelles urbaines prises en compte et les types de modèles sont des variables strictement

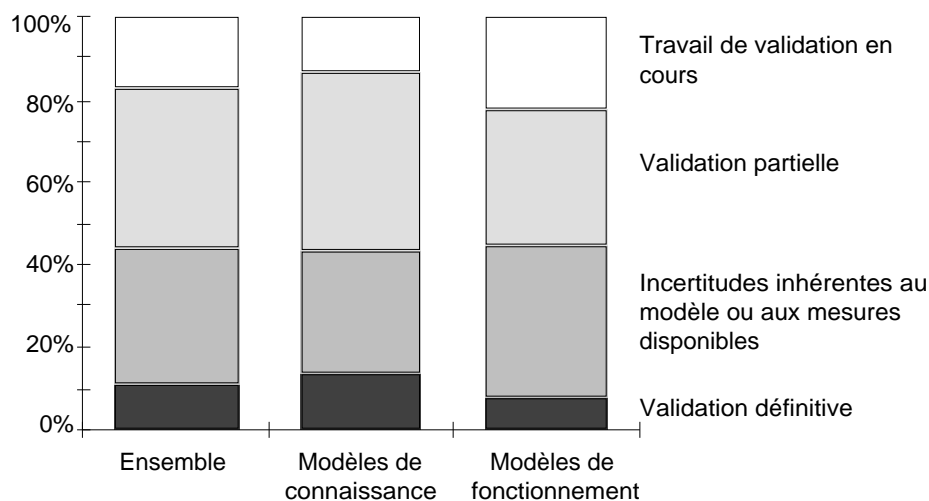
indépendantes pour le modélisateur : il n'y a pas de type de modèle privilégié pour telle échelle du champ urbain.



Type et échelles d'appréhension du champ urbain

• Connaissance / fonctionnement et niveau de validation

Compte tenu de leur nature différente, les modèles de connaissance ou de fonctionnement sont-ils plus ou moins faciles à valider dans le champ urbain ? Au contraire, les niveaux de validation des modèles des deux catégories apparaissent remarquablement conformes à la moyenne de l'ensemble (graphique ci-dessous). En particulier, on n'observe pas ici les fortes disparités constatées lorsque l'on examine les niveaux de validation par domaines ou par pôles (cf. § 3.3.1). Il semble donc que la facilité de validation ne soit pas un des critères de sélection d'un type de modèle par rapport à l'autre.

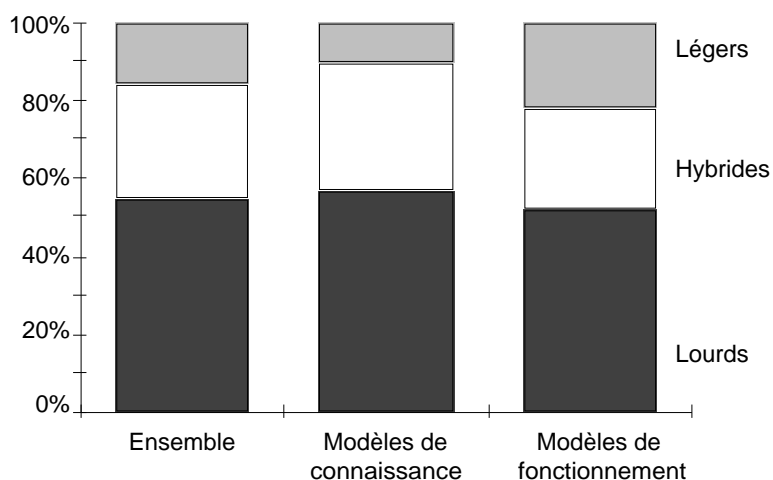


Type et niveau de validation

• Connaissance / fonctionnement et lourdeur des modèles

En dernier lieu, on peut s'interroger sur la relation entre le type des modèles et leur « lourdeur » relative définie selon le temps nécessaire pour les différentes étapes de mise en oeuvre. Une analyse précédente (cf. § 4.2.3) nous a conduit à identifier trois types de

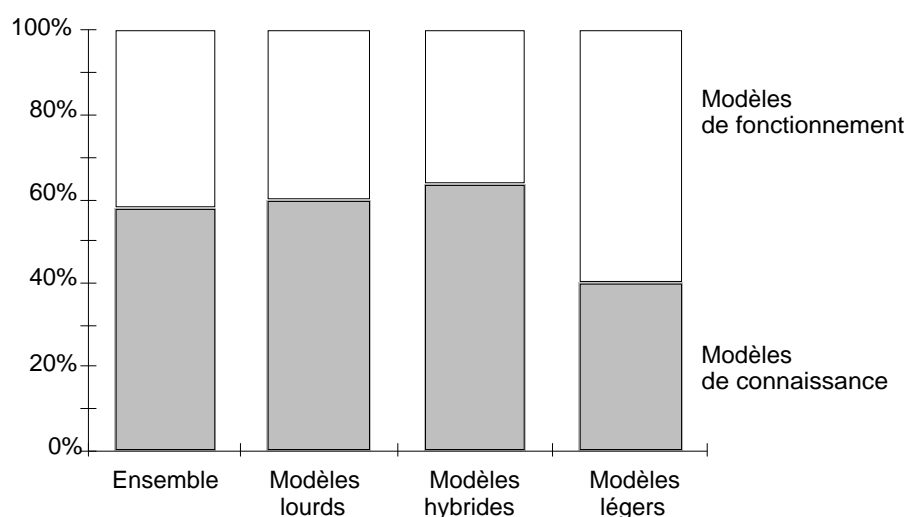
modèles sur ce critère : les modèles lourds, les modèles légers et les modèles hybrides. Si l'on rapporte ces catégories à la dualité modèles de connaissance / modèles de fonctionnement, on obtient les résultats synthétisés dans le graphique ci-après.



Lourdeur et type des modèles

Les modèles de connaissance et de fonctionnement sont conformes à l'ensemble pour ce qui concerne la part relative de modèles lourds (environ la moitié). Par contre, le rapport entre modèles de type « légers » et modèles de type « hybrides » est presque inversé dans les deux catégories : les modèles de fonctionnement présentent relativement plus de modèles légers et moins de modèles hybrides.

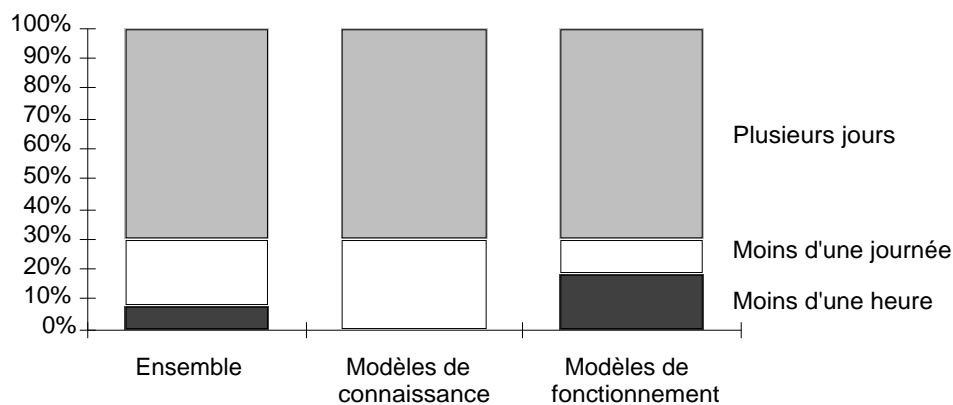
Le comptage inverse précise ces éléments (graphique ci-dessous). On remarque ainsi que, conformément à l'intuition, les modèles légers se démarquent de l'ensemble en ce qu'ils sont majoritairement du type « modèle de fonctionnement ».



Type et lourdeur

On peut également observer la part relative de la phase d'acquisition et de préparation des données selon le type de modèle (graphique page suivante). Modèles de connaissances et modèles de fonctionnement présentent tous la même importante proportion de représentants pour lesquels la phase d'acquisition et de préparation des données demande

plusieurs jours. Cependant, on remarque que les modèles de fonctionnement présentent une minorité non négligeable de représentants (près de 20 %) pour lesquels cette phase s'effectue en moins d'une heure (aucun exemple équivalent dans la catégorie des modèles de connaissance).



Temps d'acquisition et de préparation des données selon le type de modèle

Au total, il semble qu'une certaine facilité de mise en oeuvre, notamment pour la phase d'acquisition et de préparation des données, caractérise les modèles de fonctionnement, par rapport aux modèles de connaissance.

5.2.3 Conclusion

• Sur les familles de modèles

La notion même de famille de modèle semble assez confuse. Pour certains, les familles sont relatives à certains courants de pensée ou théories ; pour d'autres, elles semblent plutôt liées à un champ de recherche académique ou à une discipline. Pour d'autres encore, la famille se définit par une méthode particulière de modélisation ou de résolution dans un domaine particulier. Au total, l'inventaire des familles de modèles montre presque autant de familles que de modèles. Notons pour nuancer ce jugement qu'une bonne connaissance des différents domaines concernés permettrait sans doute une meilleure classification que celle proposée ici.

Quelque soit le sens donné au terme, les modèles décrits sont le plus souvent rattachés à une famille implicite dans laquelle il existe un ou plusieurs modèles connus comparables (28 situations répertoriées dans l'inventaire). Dans d'autres cas, les modèles s'inscrivent dans une grande famille comprenant de nombreux modèles du même type (11 situations de ce genre). Enfin, seuls deux modèles de l'inventaire ne présentent aucune similitude avec d'autres modèles connus ; ils constituent alors le germe d'une nouvelle famille potentielle. Ces catégories sont réparties de manière quasi-équivalente dans tous les domaines. On notera qu'elles restent cependant relatives à l'appréciation personnelle que se font les auteurs des modèles qu'ils proposent.

Les modèles décrits ont été généralement conçus pour répondre à un besoin particulier. Ils présentent ainsi des spécificités et des singularités qui peuvent les distinguer des autres membres de la même famille. Trois situations se présentent à ce niveau. Dans la majorité des cas, le modèle se démarque dans sa famille par son originalité, soit parce qu'il aborde un problème nouveau (originalité des phénomènes modélisés, du sujet), soit parce qu'il aborde

un problème connu de manière nouvelle (originalité de l'approche, des principes de modélisation ou de résolution mis en oeuvre). Pour un autre groupe moins important, le modèle décrit dans l'inventaire se distingue au sein de sa famille parce qu'il apparaît bien adapté aux situations urbaines traitées, en particulier pour ce qui concerne la prise en compte de la géométrie urbaine, des échelles spécifiques du champ urbain ou de méthodes de représentation et de résolution adaptées au contexte urbain. Enfin, certains modèles se distinguent parce qu'ils intègrent des fonctionnalités utiles en pratique, que les autres membres de leur famille peuvent ne pas posséder, notamment au niveau de l'interface.

On note également que plus du tiers des modèles inventoriés ne sont pas des créations ex nihilo mais résultent au contraire de la filiation d'un ou plusieurs autres modèles développés antérieurement. De même, une partie des modèles recensés ont permis d'engendrer à leur tour d'autres modèles ou sont en passe de le faire. Trois générations de modèles coexistent donc dans Inventur, la génération intermédiaire étant naturellement la mieux représentée. Ces filiations de modèle sont sans doute le signe d'une vitalité importante de la modélisation dans les différents domaines de recherche ayant trait au champ urbain. Nous rapprocherons ce signe de l'histoire déjà ancienne des modèles urbains, telle que nous l'avons constatée au travers de notre analyse de l'évolution temporelle de la production de modèles depuis les années 70.

Enfin, au travers des réponses, nous avons identifié près de 50 modèles susceptibles d'être ajoutés à l'inventaire (37 modèles en ascendance, une dizaine en filiation), ce qui porterait l'effectif général des modèles du champ urbain à plus de 110.

• Sur la dualité connaissance / fonctionnement

On peut qualifier de « modèles de connaissance » les modèles qui cherchent à imiter le plus fidèlement possible les mécanismes élémentaires expliquant le fonctionnement de l'objet modélisé. Par opposition, on appelle « modèles de fonctionnement » les modèles qui ne font que reproduire les relations constatées entre les entrées et les sorties de l'objet modélisé comme un système. Ces deux types de modèles sont représentés de manière équilibrée dans l'inventaire, avec une légère prépondérance des modèles de connaissance.

La capacité à développer tel type de modèle dans tel domaine dépend naturellement de l'état des connaissances de ce domaine. De ce point de vue, on peut considérer qu'il est plus facile de construire un modèle de connaissance dans les domaines des sciences exactes, où la connaissance des phénomènes semblent plus univoque et mieux formalisée, que dans ceux des sciences sociales où la connaissance relève parfois de l'hypothèse permanente. Cette intuition est confirmée dans l'inventaire où l'on constate que le pôle géographie présente une majorité de modèles de fonctionnement tandis que le pôle physique se démarque par une majorité de modèles de connaissance.

Cependant, tous les auteurs de modèles n'adhèrent pas à cette dichotomie. Pour certains, les modèles peuvent présenter les deux aspects suivant le point de vue adopté où la partie du modèle que l'on examine. Pour d'autres, la distinction connaissance / fonctionnement n'est pas pertinente et des qualificatifs mieux adaptés au domaine sont éventuellement proposés. Il apparaît néanmoins que, sans tenir compte de ces modèles, la répartition relative entre modèles de fonctionnement et modèles de connaissance dans les deux pôles de la géographie et de la physique reste inchangée. La distinction semble donc pertinente.

D'après nos résultats, l'appartenance à l'un des deux types de modèles n'est pas liée à l'âge du modèle : ainsi, il n'apparaît pas « d'ère » des modèles de fonctionnement ni « d'ère » des modèles de connaissance dans le panorama temporel de la production de modèles depuis plus de 20 ans. De même, les deux types de modèles présentent globalement la même qualité de diffusibilité (environ la moitié) ce qui ne permet pas d'accorder d'avantage à l'une des catégories en matière de diffusion opérationnelle. Parallèlement, aucun lien entre le type de modèle et l'échelle d'application n'apparaît, alors même que l'on pourrait intuitivement

prédire le contraire en se référant à la répartition des types de modèles dans les pôles et aux préférences relatives de chaque pôle pour ce qui concerne les échelles urbaines ; il n'y a donc pas de préférence pour un type de modèle en fonction de l'échelle abordée dans le champ urbain, du moins globalement. Par ailleurs, il apparaît que les modèles de connaissance ne sont pas plus faciles à valider que les modèles de fonctionnement ce qui, une fois encore, va contre l'intuition ou les idées reçues.

Les résultats ne permettent de distinguer les deux types de modèles que sur trois critères : l'origine du modèle, les objectifs de la modélisation et la facilité de mise en oeuvre, notamment pour la phase de préparation des données. Pour ce qui concerne l'origine, on note effectivement que les organismes institutionnels produisent en majorité des modèles de fonctionnement, alors que les autres auteurs (recherche publique et organismes privés) présentent une distribution conforme à l'ensemble. Cette distribution peut être en partie fortuite, mais elle pourrait également s'expliquer par une conjonction de facteurs, comme nous le proposons ci-après.

Plus facile à expliquer sont les résultats concernant les objectifs de la modélisation. On remarque ainsi que les modèles de fonctionnement sont beaucoup plus souvent dédiés à la prédiction et à l'aide à la décision, même si certains d'entre eux sont également utilisés à des fins de compréhension des phénomènes. Parallèlement, les modèles de connaissance présentent un remarquable équilibre entre les trois objectifs proposés, notamment par rapport à l'ensemble. Sur ce point, on peut effectivement considérer qu'un modèle de fonctionnement sera jugé plus efficace pour l'aide à la décision qu'un modèle de connaissance, sans doute plus précis mais aussi généralement plus lourd, comme confirmé ci-après. A l'inverse, il est probable qu'un objectif de compréhension des phénomènes modélisés appellera le développement d'un modèle de connaissance, plus facile à manipuler qu'un modèle de fonctionnement supposé arbitraire.

La prédiction ou l'aide à la décision exigent également une certaine facilité de mise en oeuvre des modèles. A ce niveau, on remarque que les modèles de fonctionnement sont plus souvent légers que les modèles de connaissance, suivant la nomenclature définie dans ce rapport. Parallèlement, les modèles légers sont majoritairement de fonctionnement et l'on note que la légèreté de ces modèles peut s'expliquer en partie par leur facilité relative de mise en oeuvre dans la phase de préparation et d'acquisition des données.

On peut conclure que le choix de développement d'un modèle de connaissance ou d'un modèle de fonctionnement, s'il est subordonné en partie à l'état des connaissances du domaine traité, est également dépendant des objectifs assignés à la modélisation. On préférera généralement un modèle de fonctionnement pour un objectif pratique de prédiction et d'aide à la décision, notamment parce que ce type de modèles semble plus facile à mettre en oeuvre en situation opérationnelle. Ces conclusions pourraient en partie expliquer pourquoi les organismes dits institutionnels, plus souvent confrontés au terrain, développent majoritairement des modèles de fonctionnement.

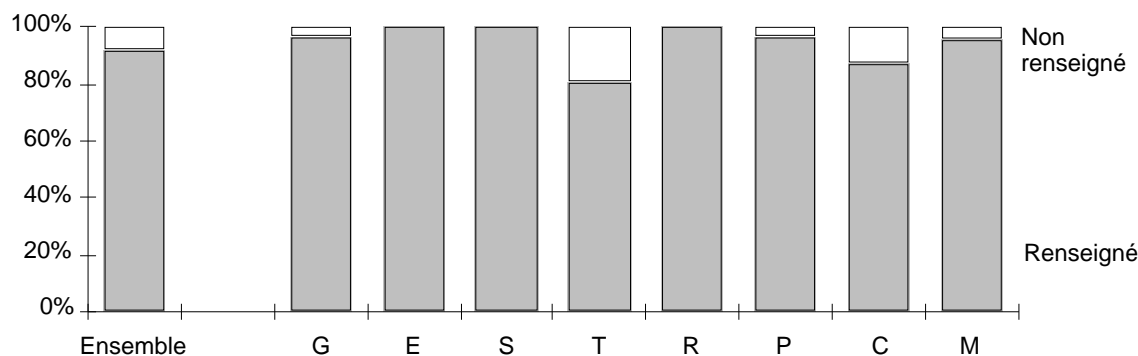
5.3 Hypothèses et méthodes

Nous regroupons dans la présente section divers champs abordant des aspects fondamentaux de la modélisation : les hypothèses et principes de formalisation utilisés, les types de construction du modèle et les méthodes de résolution mises en oeuvre. Le caractère très technique ou « intime » des informations recueillies (elles sont au coeur des modèles) ne permet pas de dégager facilement des classes homogènes. Il semble que les réponses ne soient généralement pertinentes (et même parfois compréhensibles) qu'au sein d'une communauté scientifique réduite. C'est pourquoi nous les mentionnerons de manière essentiellement signalétique, sans analyse approfondie.

5.3.1 Hypothèses et principes

• Principales hypothèses

Le champ n° 50 du questionnaire permet de préciser les hypothèses utilisées dans le modèle et, le cas échéant, les théories, paradigmes, principes ou lois générales auxquels il se réfère. La question est en général très bien renseignée (graphique ci-dessous). Le domaine des transports présente curieusement une part plus importante de non réponses. Tous domaines confondus, les réponses présentent une moyenne de 48 mots, ce qui les classe parmi les plus complètes de l'inventaire.



État des réponses au champ 50

Le décompte des occurrences des mots tous domaines confondus donne la liste suivante :

- 21 hypothese(s)
- 13 transport(s)
- 12 espace(s)
- 10 element(s), equation(s), theorie
- 9 systeme(s), noeud(s), different(s)
- 8 point(s), type(s), choix
- 7 zone(s), forme(s), reseaux, terme, energie(s), utilisation, principe(s),
deplacement(s), activite(s), calcul(s), processus, donnee(s)
- 6 plan(s), connaissance(s), spatiale(s), evolution, base(s), sources,
diffusion, temps, fonction, economique(s), modelisation
- 5 dynamique, scene, autre(s), reservoir(s), reseau, milieu, turbulence,
population(s), gravitaire, demande, effet(s), site, equilibre
- 4 logiques, concentration(s), melange(s), chimique(s), charge(s), graphe(s),
selon, conditions, place(s), moyenne(s), distribution, objet(s), echelle,

distance, projet(s), tout, propagation, debit(s), tous, homogene, localisation, paroi(s), vitesse(s), spectre, etat, permet, masse, conservation, croissance, ecoulement(s), compte, methode(s), elasticites, mode(s), motif, utilite, offre, reaction(s), generalise(s), comportement, suppose(s)

- 3 tridimensionnelle(s), reconstruction, exploitation, niveaux, navier, aleatoire(s), zonage(s), ensemble, phenomene(s), moyens, repose, reel, visuelle(s), concurrence, modal, travail, flux, central, physique, simplifiee, geographiques, quartier, emission(s), lumineuses, maille(s), agglomeration(s), principale(s), negociation(s), lobbies, prevision(s), domaine(s), pollution, batiments, circulation, nombre(s), depend, generation, fluide(s), long, motorisation, milieux, mecanique, eclairement, simples, lineaire(s), forte, affectation, voiture(s), destination, occupation, echanges, critere(s), cout(s), terrain, description, geometrie

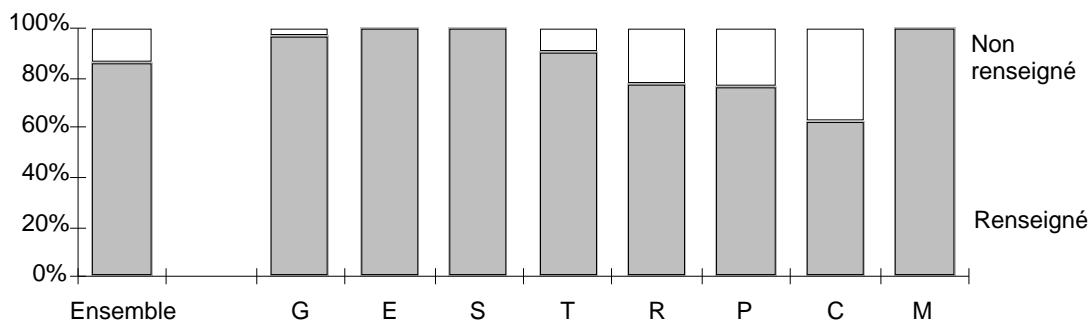
Les termes récurrents de cette liste sont pour nous peu parlants. Par ailleurs, l'analyse du contenu des réponses est difficile et ne semble pas très probante si l'on considère l'ensemble des modèles. Au travers de réponses, on obtient essentiellement un panorama du « jargon scientifique » de chaque domaine, qu'il est parfois difficile de saisir avec un regard extérieur (l'encadré ci-dessous en propose une illustration à travers quelques morceaux choisis plus ou moins ésotériques ; l'ensemble des réponses n'est pas représenté). Il semble que les réponses à cette question ne soient pertinentes qu'au sein d'une communauté scientifique réduite. Leur analyse devrait donc s'effectuer, sur le fond, dans chacune des thématiques abordées et par des experts de ces thématiques.

- Modélisation économique du comportement des usagers par le biais de coûts généralisés. Processus itératif de description des réactions des différents acteurs et de calcul de l'équilibre. - 2
- Pour la partie usage du sol : modèle de Léontieff (matrice input-output) pour les échanges économiques. Théorie de Hoyt (activité basique et induite). Théorie microéconomique (équilibre offre-demande). Partie transport : théorie de l'utilité de Domenich et Mc Fadden - 3
- Mobilité dépendante du motif de déplacement et de l'occupation du sol. Choix de la destination dépendante d'une fonction gravitaire. Choix du mode de transport fonction uniquement de la comparaison des temps généralisés de déplacement en voiture et en transport en commun. Affectation sur le principe de Wardrop. Hypothèse forte: le comportement individuel ne change pas dans le futur. - 5
- Hypothèses fonctionnelles : relations linéaires simples, stabilité au cours du temps des élasticités. Utilisation du modèle de gravité, de la théorie de la gouvernance - 6
- Utilisation de méthodes analytiques (Dogniaux) pour la détermination des énergies solaires disponibles afin de minimiser le volume de données météo à définir. Eclairement diffus isotrope ou ciel CIE. Une seule inter-reflection est prise en compte dans le calcul de l'énergie réfléchi. Application des équations de Fanger aux espaces ouverts. Utilisation du concept d'ouverture de ciel pour qualifier le confinement des espaces ouverts - 7
- Mécanique des milieux continus. Principe thermodynamique. Ecoulement en milieux poreux - 8
- Hypothèses: régime stationnaire, pas de changements d'état, échanges entre milieux opaques baignés par un fluide (air) transparent au rayonnement, diffusion lambertienne, séparation du spectre électromagnétique en 2 bandes, corps gris suivant ces bandes, comportement de l'air (vitesses, températures) indépendant de celui des parois. Lois générales : celles de la thermique - 11
- Approximation anélastique non hydrostatique (écoulements dilatables non compressibles). Approche semi-cartésienne, coordonnées curvilignes suivant le relief - 14
- Réseau ramifié, pas de contre pente. Transformation pluie-débit : réservoir linéaire. Propagation des débits : onde cinématique, méthode de Muskingum. Pollution urbaine - 17
- Hypothèse 1- On peut estimer au moins grossièrement les élasticités liant les principales variables entre elles. Hypothèse 2- Les effets systémiques (feedbacks) sont simples et linéaires, au moins dans cette première version. Hypothèse 3- les domaines retenus sont suffisants; on peut donc, dans une première étape de la recherche, négliger d'autres domaines (efficacité des transports, protection de l'environnement,...) - 21
- Réseaux de distribution d'eau en conduites forcées en état d'équilibre dynamique obéissant aux lois classiques de l'hydraulique. Disponibilité d'une prévision de consommation à l'échelle de la journée, sous forme déterministe ou sous forme de scénarios. - 29
- La localisation des noeuds du réseau (les noeuds pertinents à l'échelle considérée) dans le plan peut être modélisée comme un processus de Poisson dans l'espace. Le processus de Poisson est le processus limite d'un processus de localisation dans le plan perturbé par différents aléas. A chaque noeud du réseau correspond une zone d'action, définies géométriquement comme l'ensemble des points du plan pour lesquels le noeud est le noeud le plus proche. Cette définition permet de définir un zonage du plan en polygones convexes aléatoires, appelé mosaïque de Voronoï. D'autres type de zonage peuvent aussi être définis. Les noeuds du réseau peuvent être reliés par un graphe aléatoire, plus ou moins maillé (triangulation de Delaunay, arbre de poids minimal, trajet du voyageur de commerce, ...)(...) - 42

- Navier-Stokes en formulation compressible. Fermeture des équations de la turbulence en un point. Chimie troposphérique de jour. La canopée urbaine est modélisée (non simulée explicitement) au travers d'un modèle de sol urbain. - 43
- Le modèle utilise la notion de loi de paroi rugueuse ; l'effet de la canopée urbaine est représentée par deux paramètres : la hauteur de déplacement et la hauteur de rugosité. - 45
- Choix de destination: modèle gravitaire. Choix modal: modèle logit. Choix d'itinéraire: affectation avec contrainte de capacité selon l'équilibre de Wardrop (under equilibrium conditions traffic arranges itself in congested networks in such a way that no individual trip maker can reduce his path costs by switching routes). - 46
- Régime permanent - Ecoulement en charge. Conservation de la masse et de l'énergie. Loi d'état reliant débits et pertes de charge. - 51
- L'hypothèse est que les redistributions interurbaines obéissent simultanément à des logiques de proximité (proximité physique, sociologique ou culturelles), des logiques économiques et des logiques hiérarchiques. - 55
- Basé sur la théorie des graphes, aussi bien pour la modélisation que par l'exploitation d'indicateurs d'accessibilité et de mesure des réseaux de transport issus de la théorie des graphes. - 56
- Equation de la conservation de la masse pour les polluants (variation temporelle, advection, turbulence/diffusion, réactions chimiques, émissions, dépôt sèche, dépôt humide). Simplification de la chimie de l'ozone avec réduction du nombre de réactions/photolyses à environ 90, avec 38 espèces chimiques (mécanisme CB-IV avec regroupement des espèces en fonction de leurs liaisons C). - 61
- Lien entre la demande à court terme et l'évolution à long terme des systèmes de villes (dépendance partielle des migrants temporaires et définitifs à la performance des réseaux de transport, par le biais de la distance-temps) : Modélisation de la demande de transport (flux de déplacement) par un principe gravitaire. Modélisation dynamique (évolution des populations des villes du système), par redistribution de migrants définitifs (jeu à somme nulle), selon des " stratégies résidentielles " multiples (résumant certaines logiques de migration définitive). Evolution du système de transport selon une politique d'ajustement de l'offre à la demande de transport. Exploitation de la théorie des graphes pour la description des espaces. - 62
- La croissance et l'évolution des villes d'une même région conduisent à l'édification de systèmes de villes qui ont des propriétés communes (forte différenciation hiérarchique des villes, appuyée sur la formation de niveaux fonctionnels résultant de l'accumulation d'adaptations successives et de valorisation d'innovations, dans un contexte de concurrence spatiale, émergence de spécialisations fonctionnelles dont la durée spécifique est un peu plus courte que celle de la hiérarchie (quelques décennies au lieu de plusieurs siècles), forte instabilité momentanée des ajustements fonctionnels et de croissance de chaque ville). Les références théoriques sont la théorie des lieux centraux (Christaller) complétée et revue par une théorie évolutive des systèmes de villes. On fait l'hypothèse que ces processus généraux permettent de décrire, de simuler et de prévoir l'évolution de systèmes placés dans des conditions géographiques variées et à des moments différents. - 64

• Principes de formalisation utilisés dans le modèle, méthodes employées

Ce point fait l'objet du champ 51 de type texte du questionnaire. Ce champ est en général bien renseigné (graphique ci-dessous), notamment dans les domaines du pôle géographie (93 % des modèles renseignent le champ). Par comparaison, les modèles du pôle physique (75 % d'entre eux renseignent le champ) semblent éprouver un moindre besoin d'explication sur les principes de formalisation qu'ils utilisent.



État des réponses au champ 51

Comme la question précédente, ce champ du questionnaire Inventur aborde des caractères intimes des modèles. L'analyse globale des réponses apparaît d'autant plus difficile. Le décompte des occurrences de mots, tous domaines confondus, donne ainsi la liste suivante :

24 equation(s)
 17 methode(s)
 12 water
 11 surface, graphe(s)
 10 temperature(s)
 9 wall(s), element(s), systeme(s), principe(s), analyse, calcul
 8 calculated, distance, physique(s)
 7 transport, heat, soil(s), distribution, agent(s), partir, utilisation, reseaux
 6 using, ground, vegetation, population(s), formalisation, objet(s), different(s), point(s), action, statistique(s), modelisation, structure(s)
 5 used, with, vapour, system, theorie(s), analogie, forme(s), zone(s), fonction, scene, simple(s), partie(s), base
 4 situation(s), entite(s), contraintes, inside, epsilon, building(s), fluxes, exchange, energy, processus, noeud(s), rapport, probleme(s), optimisation, dynamique, reseau, reaction, descripteur, utilise(s), espace, comportement, hypotheses, geometrie, demande(s), etat, lois, ensemble, representation(s), type(s)
 3 regard(s), value(s), morphologie, conditions, leaves, root(s), plant, well, source(s), diffusion, term(s), sink, will, transfer, canopy, turbulence, windfield, bati, poisson, modelises, relation(s), consiste, ciel, geometrique(s), mise, parametre(s), maniere, module(s), densite, classique(s), aide, description, elementaire(s), assemblage, regle(s), force(s), formalisme, gravitaire, service(s), interaction, differentielles, aleatoire, variable(s), multi, facon, dessus, utilisant, lineaire(s), numerique, equilibre(s), deplacement(s), recherche, defini(s), bien

Il semble difficile d'interpréter ces résultats. On notera que la présence importante de termes anglais est due au fait que, parmi l'ensemble des réponses à cette question, celle proposée en anglais pour le modèle ENVI-MET (ID 47) est particulièrement développée. La réponse du modèle ID 60 (GARIN-LOWRY) est également proposée en anglais.

Une analyse du contenu des réponses est possible mais périlleuse, compte tenu de la variété des domaines abordés et celle des méthodes proposées. Néanmoins, nous pouvons repérer de manière indicative les principes de formalisation les plus communs mentionnés par les auteurs. Nous relevons ainsi (dans le désordre) :

- **Des systèmes d'équations associés à différentes méthodes numériques :** écriture d'un bilan thermique pour chaque facette, calcul des différents flux, traitement numérique itératif des couplages physiques (ID 11), simples équations linéaires utilisant des transformations logarithmiques ou par la loi log-normale (ID 12), système d'équations différentielles (ID 22), calcul de type éléments finis déterministe (ID 23), calcul matriciel (ID 31), modèle Eulérien sur grille cartésienne déformée par le relief, discrétisation par différences finies, schémas d'ordres 1 et 2, schéma QSSA pour les équations de la chimie (ID 43), modèle Eulérien sur grille cartésienne inhomogène (ID 44), système d'équations aux dérivées partielles de transport-réaction et d'équations algébriques, les conditions aux limites (concentrations injectées dans le réseau) étant connues (ID 53), discrétisation des équations différentielles par une méthode volumes finis (ID 54), systèmes d'équations différentielles dérivé d'une formalisation par les équations maîtresses pour la simulation dynamique (ID 55), équation gravitaire dissymétrique, probabiliste (ID 62), etc.
- **Des méthodes statistiques et économétriques et celles dites de recherche opérationnelle :** lois de fonctionnement, probabilités d'état et de transition d'état, chaînes de Markov (ID 4), méthodes statistiques, méthodes de la recherche opérationnelle pour l'affectation sur les réseaux : calcul de plus court chemin, recherche d'équilibre (ID 5), analyse de la variance (ID 9), méthodes économétriques classiques (ID 33), méthodes statistiques et économétriques (ID 40), statistique inférentielle (ID 52), etc.

- **Des méthodes géométriques :** géométrie sphérique (ID 7), projections axonométriques ou perspectives, procédure de détermination des parties vues et cachées par des opérations géométriques booléennes sur des polygones (ID 35, 36, 37).
- **La théorie des graphes :** graphe de structure urbaine renvoyant à des types morphologiques (ID 1), graphes (ID 4), graphe aléatoire associé au processus de Poisson (ID 42), théories des graphes et optimisation (ID 51, 52), graphes valués (ID 56), etc.
- **Les systèmes multi-agents :** système multi-agents développé et mis en oeuvre du point de vue informatique avec les concepts de l'objet (16), système multi-agents avec contraintes (57), systèmes multi-agents (64), etc.
- **Les modèles objets :** chaque ménage est défini comme un objet avec les méthodes qui modèlent son comportement (ID 21), modèle objet (ID 27), modèle objet, réactif et cognitif (ID 28), etc.
- **Un système de règles** (ID 59).
- **Des méthodes d'optimisation :** optimisation de grands systèmes, méthodes de décomposition / coordination et d'agrégation / désagrégation en optimisation (ID 29).
- **Des lois empiriques :** lois semi-empiriques (modèle de Bottema, 1996), exprimant les hauteurs de déplacement et de rugosité en fonction de la structure du bâti (ID 45)
- **D'autres principes :** formulation en logit hiérarchique (ID 3), utilisation du modèle de gravité, structure systémique avec recalcul des variables par boucles de retroaction (ID 6), modèle utilisant le formalisme NIAM (ID 24), utilisation du principe d'action-réaction comme règle d'assemblage (ID 25, 26), carroyage de l'espace initial, interpolation linéaire le long de transects sécants (ID 49).

Naturellement, un même modèle peut mettre en oeuvre plusieurs principes. Par ailleurs, certains principes proposés dans les réponses, difficiles à saisir, ne sont pas signalés ici.

5.3.2 Méthodes

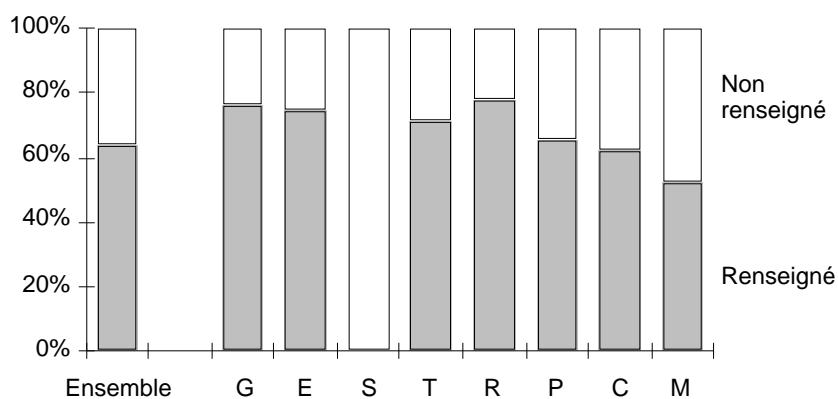
• Construction du modèle

Le modèle a-t-il été construit par l'agencement d'autres modèles, organisés en modules ou composants plus ou moins autonomes ? Le champ 52 du questionnaire Inventur porte sur ce point en proposant de décrire les principes de construction du modèle.

Ce champ est assez bien renseigné dans tous les domaines (graphique page suivante). Les rédacteurs du questionnaire proposent trois styles de réponses qui mettent en avant **l'ambiguïté sémantique entre « modules » et « modèles » :**

- a) le modèle n'est pas modulaire : il est autonome et **construit comme une entité homogène** (minorité des réponses) ;
- b) le modèle est **construit sur la base de sous-modèles, sans que l'on sache si ces sous-modèles constituent des modules individualisés ;**
- c) inversement, le modèle est **construit autour de modules ou composants plus ou moins autonomes, sans que l'on sache si ces composants constituent autant de sous-modèles** susceptibles d'être individualisés.

L'encadré page suivante illustre ces catégories.



État des réponses au champ 52

a) Le modèle est n'est pas modulaire

- Le logiciel a été entièrement développé en CLOS (Common Lisp Object System) qui est un langage orienté-objet dynamique. L'interface utilisateur ainsi que les algorithmes de simulation sont intégrés dans le même code. - 7
- Stand-alone model. Output can be displayed and printed by add-on WINDOWS program LEONARDO. - 47
- Le modèle a été développé dans un système logiciel particulier qui le rend tout à fait autonome. - 49
- Non, on a simplement repris des modèles statistiques pour l'analyse des sorties du modèle (courbes d'évolution de population, distribution rang-taille, carte des niveaux fonctionnels). - 64

b) Le modèle est construit sur la base de sous-modèles, sans que l'on sache si ces sous-modèles constituent des modules individualisés

- Accumulation de la pollution en surface : Formule de Alley-Smith (1981). Lessivage des sols par temps de pluie : Formule de Jewell-Adrian (1978). Transport en collecteur : Formule de Vélikanov (antérieur à Flupol) - 17
- Accumulation de la pollution en surface : Formule de Alley-Smith (1981). Lessivage des sols par temps de pluie : Formule de Jewell-Adrian (1978). Transport en collecteur : Formule d'Ackers-White (antérieur à HYDROWORKS). Plusieurs modèles de transformation pluie-débit : réservoir linéaire de Desbordes (utilisé en France), double réservoir linéaire, Horton, Green-Ampt... - 18
- Modèle de choix: les ménages se voient attribuer un certaine CSP, puis un emploi, puis une résidence; Modèle Basique/Non-Basique; Modèle de gravité à la LOWRY; - 21
- Le modèle comprend 2 équations génériques, l'une pour les populations, l'autre pour les activités. Les équations des deux populations et les quatre activités ont des structures respectivement similaires et ne diffèrent que par les valeurs des paramètres. Le nombre total d'équations correspond au nombre de zones multiplié par six. - 22
- Les composantes géométriques du modèle sont les mêmes à différentes échelles, mais selon la partie du réseau de télécom modélisée, l'agencement des briques pourra varier. Dans le cadre de l'exploration de l'utilisation de ces concepts géométriques pour la répartition spatiale des activités économique, un modèle des relations entre valeurs économiques produites et consommées en différents points du plan, influencées par leur proximités vis à vis des noeuds du réseau, a été établi. - 42
- ARPS 3.0, Kessler, Berry-Reinardt, TRANSCHIM, MOCA, VLx, SM2 (voir plus haut). - 43
- Le modèle inclut différentes versions du modèle k-epsilon de fermeture des équations de la turbulence. Il est écrit de manière modulaire permettant son adaptation à de nouvelles géométries. - 44
- Le modèle de base est un SIG expérimental construit sur le module SMECI d'ILOG : Orienté Objet + système expert. Le reste a été conçu par l'auteur. Sur ce système, les classes de bases ont été construites pour représenter l'information géographique : Les données géographiques sont représentées en graphe planaire complet : - des classes thématiques, - trois classes métriques : face, Arc, Noeud qui portent la géométrie des objets. Les objets géométriques sont reliés par des relations topologiques : connexion, inclusion. D'autres classes ont été développées pour porter les nouvelles informations du modèle : - des classes pour porter des analyses sur les groupes : appelé niveau méso, - des classes pour décrire les contraintes dans le processus, - des classes pour porter des outils d'analyse spatiale : Delaunay, Arbres sans cycle. - 57
- Le module de chimie est le mécanisme CB-IV amélioré. L'état météorologique est déterminé en amont de UAMV par le modèle SAIMM. L'inventaire des émissions de NO₂, NO et de composés organiques volatils, nécessaire en entrée d'UAMV, a été généré par le module EPS2. - 61
- Modèle RES pour la création de graphes d'espaces théoriques, afin de disposer d'une offre d'espaces plus riche (en termes d'échelles spatiale, d'unités spatiales de référence), de portée plus générale dans les conclusions émises à l'issue de l'exploitation du modèle RES-DYNAM. - 62

c) Le modèle est construit autour de modules ou composants plus ou moins autonomes, sans que l'on sache si ces composants constituent autant de sous-modèles susceptibles d'être individualisés

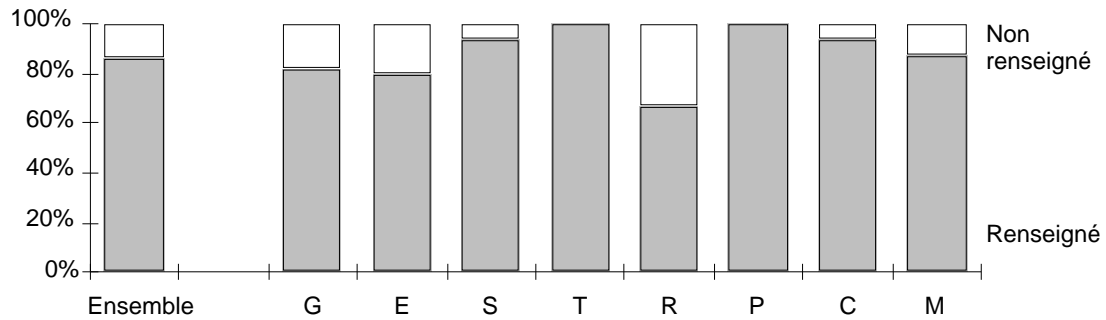
- Le ou les modèles sont construits "sur mesure" par des agencements de modules autonomes tous développés dans le cadre de AMAP - 4
- la partie transport est autonome (améliorations proposées par le concepteur par rapport aux modèles classiques à 4 étapes) - 3
- 4 modules autonomes : - génération des déplacements. - distribution des déplacements. - choix modal. - affectation sur les réseaux - 5
- motorisation individuelle, puis mobilité globale, puis choix modal pour la mobilité - 9
- Oui. On note (A) les modules antécédents, et (M) ceux développés pour le modèle: - Calcul de flux solaires incidents sur les facettes (SOLENE-enseillement, A) - Radiosité pour la bande solaire (A), calcul des flux solaires nets entrant dans les bilans - Initialisation des températures de surface - (*) Radiosité dans la bande IR (M), calcul des flux IR nets - Application des bilans thermiques (M) prenant en compte les différents flux, et deduction des températures de surface - Iteration (*) jusqu'à convergence (M) - 11
- Le modèle utilise le logiciel MINUTP comme boîte à outils. Les autres modules ont été développés spécifiquement pour ANTONIN. - 19
- Le logiciel comporte plusieurs modules: * Module principal (simple interface de lancement des autres modules). * Modules de visualisation: - Spectres des sources - Spectres des matériaux - Indicatrices des sources. * Modules de mise en forme: - Définition des bibliothèques de matériaux - Habillage des scènes (maillage et choix des matériaux) - Définition des sources d'éclairage (propriétés géométriques et photométriques) - Définition du projet (scène + sources + objets) * Module de calcul - 23
- Le modèle utilise un module d'Analyse de réseau (Network Analyst) développé sous ArcView. - 32
- - Module développé préalablement au présent modèle: Base caméra équipée de capteurs permettant l'acquisition en temps réel des valeurs angulaires des panoramiques et des commandes de zoom et de mise au point. Ces données sont formatées et stockées avec le signal vidéo de la scène filmée. - Module développé pour ce modèle: Exploitation simultanée des données et des images permettant de calculer les images virtuelles du projet architectural simplifié et de générer le compositing temps réel. - 34
- modules de modélisation géométrique (développés avec le modèle). modules de visualisation et de projections (développés avec le modèle). modules d'analyse de visibilité dans une scène (développés avec le modèle). module de discrétisation spatiale (module externe) - 35
- modules de visualisation et de projections (développés avec SOLENE solaire). modules d'analyse de visibilité dans une scène (développés avec SOLENE solaire). module de discrétisation spatiale (module externe) - 36
- Le modèle est dit à 4 étapes. Ces 4 composants sont cependant très dépendants et ne peuvent être utilisés séparément : - génération: déplacements émis et attirés par chaque zone, - distribution: choix de destination, - choix du mode, - affectation : choix d'itinéraire. - 46
- modules de visualisation et de projections (développés avec SOLENE solaire). modules d'analyse de visibilité dans une scène (développés avec SOLENE solaire). application de modèle de ciel (modèle de Perez). module de discrétisation spatiale pour le maillage (module externe). module d'évaluation des facteurs de forme (calcul amélioré). résolution itérative des radiosités pour les réflexions (développé avec le modèle) - 37
- Le modèle PORTEAU-OPOINTE comprend - un module graphique : PORTEAU - le module de calcul : OPOINTE - d'autres modules de calcul sont possibles (ex: ZOMAYET) - 52
- Il y a deux principaux modules : - estimation des paramètres du modèle à partir de données sur la distribution de la population urbaine aux différentes dates considérées et des matrices de migration interurbaines entre ces dates (en général les dates de recensement) ; - équations différentielles pour simuler la dynamique. - 55
- - Map : modélisation, création et élaboration de graphes de réseau de transport. - Nod : calculs sur les graphes et production de résultats. - Map : visualisation et construction de représentations graphiques des résultats de Nod. Les deux logiciels sont conçus pour fonctionner ensemble. - 56

• Méthodes de résolution

Cette question importante de la modélisation fait l'objet du champ 53 de type texte du questionnaire Inventur. Le champ est en général bien renseignée (graphique page suivante), très bien dans les domaines des transports et de la physique, moins bien dans les domaines des réseaux, de l'économie et de la géographie.

Le décompte des occurrences de mots, tous domaines confondus, donne la liste ci-dessous :

```
26 methode(s)
24 calcul(s)
17 numerique(s)
13 resolution, fini(e)s
12 empiriques, formule(s)
```



État des réponses au champ 53

8 solutions, equation(s)
 7 algorithme(s), analytique(s)
 6 contraintes, scene, semi, differences, elements
 5 projection, distance, application(s), base(s), analyse(s), lineaires, fonction(s)
 4 etape, connaissances, pixel(s), moyenne, spatiale(s), chemin(s), maillage, systeme(s), recherche
 3 procedurales, situation, graphe(s), newton, aspect, procedure(s), choix, module(s), optimisation, donnees, partir, transport, milieu, visibilite(s), utilisation, simulation, volumes, discretisation, temps, geometriques, aide, ciel, utilisee(s)

Les méthodes du calcul numérique et les formules empiriques semblent être principalement utilisées. Les résultats sont cependant légèrement différents par pôles. Ainsi, pour les modèles du pôle géographie, on obtient les termes suivants :

9 calcul(s)
 8 methode(s)
 6 contraintes, algorithme(s)
 5 figure, fonction(s), numerique
 4 etape, connaissances, pixel(s)
 3 procedurales, situation, solutions, choix, module(s), application(s), base(s), empiriques, formule(s)

Et dans le pôle physique :

17 methode(s)
 13 calcul(s)
 12 fini(e)s
 11 numerique(s), resolution
 7 empiriques, formule(s), equation(s)
 6 elements
 5 semi, differences, analytiques, solutions
 4 scene
 3 newton, aspect, projection, analyse(s), optimisation, volumes, discretisation, ciel, maillage, lineaires, systeme(s)

L'utilisation de méthodes de calcul numérique de type éléments finis, différences ou volumes finis (discrétisation, maillage) semble être l'apanage des modèles du pôle physique. Ceux-ci utilisent également des formules empiriques ou des méthodes d'optimisation. Dans le pôle géographie, les méthodes semblent plus disparates (algorithmes, contraintes, fonctions, étapes de calcul, formules empiriques, etc.)

L'analyse du contenu des réponses nous semble ici très délicate, dans la mesure où les méthodes utilisées sont intimement liées à la construction et à la formalisation des modèles, sans compter le fait que le vocabulaire désignant des méthodes analogues peut varier d'un domaine à l'autre.

5.3.3 Conclusion

Nous venons d'aborder dans cette section certains des aspects les plus fondamentaux de la modélisation : les hypothèses et principes de formalisation utilisés, les types de construction du modèle et les méthodes de résolution mises en oeuvre. Il s'avère que l'on entre ici dans l'intimité des modèles et au coeur des techniques de modélisation, dans une sorte de territoire réservé des modélisateurs dont la langue apparaît bien souvent obscure et à caractère initiatique.

Ainsi, lorsque l'on examine les hypothèses utilisées dans les modèles et, le cas échéant, les théories, paradigmes, principes ou lois générales auxquels il se réfère, on est surpris par le caractère ésotérique des réponses et par l'ampleur du « jargon scientifique » utilisé. Il semble que les réponses à ce type de question ne soient pertinentes qu'au sein d'une communauté scientifique réduite qui ne recouvre même sans doute pas l'intégralité d'un seul domaine. L'analyse de ces réponses devrait donc s'effectuer, sur le fond, dans chacune des thématiques abordées et par des experts de ces thématiques, office que nous ne pouvons naturellement pas remplir ici.

Les principes de formalisation utilisés dans les modèles semblent plus familiers. Ils laissent ainsi apparaître des approches classiques (systèmes d'équations, méthodes numériques, méthodes statistiques et économétriques, méthodes géométriques, théorie des graphes, systèmes multi-agents, modèles objets, méthodes d'optimisation, lois empiriques), mais ils révèlent également d'autres principes qui sont inconnus de nous. Dans l'ensemble, on note une grande variété d'approches différentes. En matière de résolution proprement dite, l'utilisation de méthodes de calcul numérique de type éléments, différences ou volumes finis semble être l'apanage des modèles du pôle physique, tandis que ceux du pôle géographie s'appuient sur des méthodes plus disparates. Cependant, l'analyse des réponses apparaît très délicate, dans la mesure où les méthodes semblent intimement liées à la formalisation des modèles, sans compter le fait que le vocabulaire désignant ces méthodes varie d'un domaine à l'autre.

La question de la construction du modèle est significative d'une ambiguïté sémantique non levée dans le champ de la modélisation : celle existant entre les termes phonétiquement et étymologiquement proches « modules » et « modèles » (lat. *modulus*). Ainsi, deux groupes de modèles apparaissent : ceux qui sont construits sur la base de sous-modèles, sans que l'on sache si ces sous-modèles constituent des modules ou composants individualisés ; inversement, ceux qui sont construits autour de modules ou composants plus ou moins autonomes, sans que l'on sache si ces composants constituent autant de sous-modèles susceptibles d'être individualisés.

6.

Conclusion générale et éléments de discussion

6.1 Contexte et objectifs (rappel)

En 1998, l'ex Projet-Ville du CNRS lançait une action d'inventaire des modèles existant actuellement dans le champ urbain, tous domaines confondus. Ce projet était baptisé Inventur (contraction de *Inventaire* et *Urbain*) et confié en partenariat à deux équipes formées de géographes et d'architectes utilisant tous des techniques de modélisation dans leurs domaines. Devait en résulter une analyse typologique des modèles urbains qui fait l'objet du présent rapport.

Compte tenu de la variété des recherches ayant trait à la ville, ainsi que de la polysémie des termes utilisés, une définition restrictive de la notion de modèle a été mise en place. Ainsi, un modèle susceptible de figurer à l'inventaire est défini comme « un outil d'intelligibilité, développé à partir d'une formalisation logico-mathématique, suivant des hypothèses strictement énoncées, et pour lequel un travail de validation a été entrepris, permettant *in fine* de produire des connaissances sur un ou plusieurs phénomènes observables dans un champ donné ». Parallèlement, le champ urbain est considéré comme l'ensemble des phénomènes naturels et anthropiques observables au niveau de fragments urbains, d'entités urbaines globales ou de systèmes de villes dans un territoire. Les modèles peuvent s'appliquer indifféremment à tout phénomène du champ urbain. A titre indicatif, huit grands domaines et 44 champs relatifs ont été proposés.

En pratique, le projet s'est appuyé sur un questionnaire interdisciplinaire qui propose 98 champs de différents types pour décrire chaque modèle. Cette liste de champs est organisée en trois parties principales qui concernent successivement une présentation générale du modèle (identification du modèle et de ses auteurs, domaines et thèmes d'application, phénomènes étudiés, objectifs et opérationnalité du modèle, ses échelles et dimensions dans le champ urbain, sa famille éventuelle), une description scientifique et technique du modèle articulée autour des problèmes propres à la modélisation (problématique et hypothèses, formalisation et construction du modèle, méthodes de résolution, sensibilité, validation et limites), de la nature des données et résultats, puis des questions pratiques de mise en oeuvre (matériel, système et code, temps de mise en oeuvre, documentation et utilisation), et enfin une description libre du modèle, comprenant un abstract, les publications relatives au modèle ainsi que d'autres commentaires éventuels). Une quatrième partie propose au rédacteur du questionnaire de mieux s'identifier par rapport au modèle et d'apporter un point de vue sur celui-ci ; elle est facultative.

Ce questionnaire a principalement été diffusé via le réseau Internet. Au total, 64 modèles ont été recensés entre le 4 septembre 1998, date d'ouverture de l'inventaire, et le 19 juillet 1999, date de réception du dernier modèle recensé. L'enregistrement des modèles a connu une phase croissante de son ouverture jusqu'au milieu du mois de novembre 1998, après quoi les réponses furent plus espacées. Quatre séminaires d'analyse thématique des modèles ont également été organisés en novembre et décembre 1998. Rappelons également que le Projet-Ville du CNRS, promoteur du projet, a cessé d'exister au début de l'année 1999.

Les descriptions des 64 modèles recensés forment un matériau riche et complet qui constitue, en brut, l'équivalent d'un volume de 100 pages pleines si l'on compte environ 500 mots par pages. Le sérieux et la méticulosité des rédacteurs du questionnaire sont ici à souligner : près de 80 % modèles renseignent au moins la moitié des champs proposés, avec une moyenne à plus de 750 mots par description complète. On note également que les rédacteurs répondent « en scientifiques », en précisant le plus clairement les éléments qui sont au coeur de la modélisation : la problématique, les hypothèses, les principes de formalisation et les méthodes employées. Mais ils ne dédaignent pas de s'étendre également sur les limites de leur modèle, sur les perspectives de recherche pour améliorer le modèle, la

nature des résultats et des données, les phénomènes modélisés ainsi que sur les applications effectives du modèle dans le champ urbain.

Nous avons exploité ce matériau en utilisant des techniques d'analyse appliquées à la quasi totalité des champs du questionnaire, ainsi que différentes méthodes permettant les recoupements transversaux des informations. Nous avons également choisi d'appliquer un regard panoramique sur les modèles, en évitant autant que possible de mettre en avant les cas particuliers. Ce faisant, nos conclusions ne forment ni une compilation de monographies sur les modèles recensés, ni un état de l'art sur la modélisation urbaine, ni toute autre tentative de comparaison des modèles. Nous nous sommes en réalité interdit ces approches qui appellent une compétence pluridisciplinaire qu'il semble difficile de prétendre réunir aujourd'hui en un seul individu.

Cependant, ce rapport n'est pas non plus une simple lecture statistique des réponses à l'inventaire. Au contraire, nous avons souhaité organiser nos résultats autour de quatre parties qui forment selon nous des problématiques communes de la modélisation appliquée au champ urbain : 1) l'état des problématiques actuelles de la modélisation urbaine, 2) les motivations des auteurs, 3) les capacités et limites opérationnelles des modèles, et enfin 4) une appréciation succincte des aspects scientifiques de la modélisation. Il nous a donc semblé possible d'extraire de l'inventaire divers éléments susceptibles d'éclairer ces problématiques de manière transversale et d'apporter un point de vue général sur la modélisation urbaine. Nous proposons une synthèse de nos conclusions par parties dans la prochaine section avant de discuter plus avant les résultats.

6.2 Synthèse des conclusions

Nous reprenons ici les principales conclusions de quatre parties de ce rapport. Le caractère synthétique de ces propositions ne permet pas de reproduire l'ensemble des résultats, si bien que l'on admettra ici un style parfois contrasté alors même que la matière mériterait une vision moins directe et plus nuancée des résultats. Pour ces raisons, nous renvoyons le lecteur aux conclusions partielles qui émaillent le rapport (paragraphes reconnaissables à leur surlignage vertical à gauche), ainsi qu'aux résultats eux-mêmes chaque fois que l'une de nos assertions lui paraîtra discutable.

6.2.1 *État des problématiques actuelles de la modélisation urbaine*

Que modélise-t-on dans le champ urbain, à quelles échelles et depuis quand ? Nous avons abordé ces questions au travers des domaines, thèmes et principaux phénomènes modélisés dans les modèles recensés, de l'évolution chronologique de la production de modèle suivant ces thèmes, ainsi que des échelles du champ urbain appréhendées et des dimensions prises en compte dans les modèles.

On retiendra en premier lieu que la production de modèles dans le champ urbain est un fait ancien dont on peut dater les prémises à la fin des années 70. Ainsi, depuis 20 ans au moins, plusieurs modèles sont produits chaque année dans les différents domaines de recherche relatifs à la ville. Ce phénomène semble s'accélérer depuis le début des années 90 où l'on observe une envolée subite du nombre de modèles produits par année. Ainsi, bien que les modèles recensés dans leur ensemble accusent un âge moyen respectable (année moyenne de création en 1991), plus de la moitié de ceux-ci ont été créés ces quatre dernières (de 1995 à 1999). Ce phénomène ne paraît pas résulter de la méthodologie d'inventaire, dont on pourrait penser qu'elle favorise les productions récentes qui ne passeront peut-être pas l'épreuve du temps ; au contraire, une part importante des modèles récemment produits sont en partie ou complètement repris de modèles anciens, ce qui peut certainement gager de leur pérennité.

Ces constats dénotent un fort engouement actuel pour les activités de modélisation du champ urbain, que l'on peut lier par ailleurs à une certaine démocratisation des outils informatiques depuis le milieu des années 90, tant dans le rapport coût / puissance qu'en facilité d'usage, notamment pour les développements.

En second lieu, on retiendra que les modèles recensés sont produits dans tous les domaines urbains (sauf la sociologie) et ces modèles présentent le plus souvent des aspects fortement pluridisciplinaires (chacun d'eux appartient en général à plusieurs domaines). Cependant, cette pluridisciplinarité apparente ne présume pas toujours d'une réelle interdisciplinarité et elle cache un ordre plus rigoureux. En effet, plusieurs analyses montrent et confirment une organisation bipolaire remarquable des modèles de l'inventaire. Ceux-ci s'organisent en deux pôles, équivalents en nombre et bénéficiant tous deux de la forte croissance de la production de modèles de ces dernières années, l'un articulé autour du domaine de la géographie et comprenant l'économie urbaine et les transports, et l'autre articulé autour de la physique et comprenant les domaines des réseaux techniques et des risques. Les modèles du domaine des morphologies urbaines se répartissent entre ces pôles en s'associant de manière privilégiée aux principaux domaines formant ces pôles. La dichotomie entre sciences de la société et sciences de la nature, elle-même véhiculée dans les clivages académiques, transparait donc fortement dans les domaines abordés par la modélisation urbaine.

Ce découpage bipolaire est également sensible lorsque l'on examine la hiérarchie des thèmes abordés dans les modèles. Cela étant, on note parmi les thèmes les mieux représentés, tous domaines confondus, la forte présence des sujets relatifs aux transports, soit en eux-mêmes, soit associés aux préoccupations de chacun des pôles : mobilité quotidienne, localisation des activités, utilisation du sol dans le pôle géographie, aéraulique, pollution de l'air, acoustique urbaine dans le pôle physique. Une analyse plus sémantique des phénomènes que les modèles permettent de simuler ou d'évaluer corrobore ces conclusions : le mot « transport » arrive nettement en tête des termes les plus souvent utilisés dans l'ensemble des réponses.

Au total, malgré la représentation moyenne dont fait l'objet le domaine proprement dit des transports en nombre de modèles, on retiendra que les thèmes propres à ce domaine sont prédominants dans l'inventaire et traversent l'ensemble des autres thèmes. Le « phénomène transport » semble bien placé au centre de toutes les préoccupations de la modélisation. Les problématiques de transports apparaissent ainsi comme une préoccupation transversale de la modélisation urbaine, répondant en cela aux préoccupations actuelles émanant de la demande sociale, soit dans la structure des réseaux de transports en matière d'aménagement, soit dans les effets des transports en milieu urbain, dont principalement la pollution et le bruit.

Le caractère fédérateur des préoccupations relatives aux transports, tant pour l'ensemble de l'inventaire que dans chacun des pôles, peut être également expliqué par le fait que ce domaine, comme celui des réseaux techniques d'ailleurs, couvre toutes les échelles du champ urbain : depuis le fragment urbain jusqu'aux échelles de la ville (considérée comme une entité globale) et celle des systèmes de villes dans un territoire. A l'inverse, les autres domaines représentés dans l'inventaire s'appliquent à des échelles urbaines plus circonscrites : la ville et les systèmes de villes sont préférés dans le pôle géographie, les fragments urbains dans le pôle physique. Cependant, tous domaines confondus, la forte croissance de la production de modèles ces dernières années profite essentiellement à l'échelle des fragments urbains, associées ou non à celle de la ville. Les phénomènes modélisés apparaissent ainsi plutôt locaux, pris isolément ou en regard de leurs implications sur l'ensemble du territoire urbain. Peu de modélisateurs semblent considérer aujourd'hui à la ville comme une entité globale isolée. De même, l'intérêt pour l'échelle des systèmes de villes, qui a connu une évolution soudaine en 1995 et 1996, ne se confirme plus depuis lors dans l'inventaire.

Il est clair que l'appréhension de l'espace dans les modèles est avant tout liée à des logiques inhérentes aux phénomènes en jeu. De manière générale, il apparaît que les modèles du pôle géographie (mais aussi ceux du domaine des réseaux techniques) ont une préférence accusée pour l'analyse de la ville en deux dimensions. Dans ces domaines, le champ urbain est une carte et les phénomènes modélisés s'inscrivent dans la logique de ce support. Dans le pôle physique au contraire, la ville est plus souvent constituée d'un assemblage de fragments urbains, formant un milieu dans lequel les phénomènes modélisés occupent les trois dimensions de l'espace. Il semble que ces logiques forment des « paradigmes » bien distincts qui se recoupent peu. Ce partage des dimensions est par ailleurs indépendant de l'âge des modèles.

6.2.2 Motivations des auteurs

Qui fabrique des modèles, dans quels objectifs et pour qui ? Pour répondre à ces questions, nous avons analysé les champs correspondant à la provenance des modèles, aux objectifs de la modélisation et aux problématiques qui ont conduit au développement des modèles, au public potentiellement visé par ceux-ci, ainsi qu'à la diffusabilité et à la diffusion effective des modèles vers ce public. Les résultats obtenus sur ces points sont ceux qui, selon nous, prêtent le plus à discussion.

En premier lieu, il faut restreindre nos conclusions aux modèles issus des organismes de recherche français. En effet, la mise en oeuvre de l'inventaire, dans le cadre des institutions nationales du CNRS, a focalisé l'attention sur les laboratoires publics, si bien que la très grande majorité des modèles recensés proviennent de ce secteur. Les autres modèles sont issus d'organismes de recherche institutionnelle (hors université) et du secteur privé. Dans ce cadre, ce sont les organismes français qui ont été principalement touchés, même si le cinquième des modèles de l'inventaire peuvent être considérés comme internationaux.

En conséquence, ce sont principalement leurs concepteurs et leurs développeurs, c'est-à-dire les chercheurs, qui décrivent les modèles. Moins du quart des réponses proviennent de simples utilisateurs. Par ailleurs, une part importante des concepteurs de modèles sont également utilisateurs de ces modèles et, si l'on examine le niveau d'utilisabilité des modèles, on constate qu'ils s'adressent en grande majorité à un public de type expert, dont les chercheurs font naturellement partie. De même, lorsqu'on interroge les rédacteurs du questionnaire sur le public visé par les modèles, on est surpris de constater que, tous domaines confondus, les chercheurs sont le plus souvent cités.

On déduit de ces résultats une proposition sans nuance : les modèles sont principalement conçus par des chercheurs et avant tout pour des chercheurs. Autrement dit, les chercheurs produisent des modèles pour eux-mêmes, c'est-à-dire pour leur communauté scientifique. Ces modèles participent au mouvement de la connaissance et la modélisation apparaît alors comme l'un des outils du travail de recherche, tant sur le plan appliqué (la production du modèle) que sur le plan fondamental (la construction de connaissances nouvelles).

Dans ce contexte la conception et le développement des modèles comme outils pratiques pour d'éventuels utilisateurs finaux pourraient être envisagée comme un effet résiduel de la recherche. En effet, tous domaines confondus, les ingénieurs et architectes, les étudiants, les aménageurs, urbanistes et autres praticiens de l'espace urbain, sont cités comme utilisateurs potentiels, après les chercheurs eux-mêmes.

Pourtant, lorsque l'on demande aux rédacteurs du questionnaire de préciser les objectifs de la modélisation, ceux-ci disent produire avant tout des outils dédiés à la prédiction et à l'aide à la décision, tandis que les objectifs relatifs à la production de connaissances (analyse et compréhension des phénomènes) sont les moins bien représentés. Ceci reste vrai dans tous les domaines et dans les deux pôles (géographie et physique), ce qui tend à laisser croire que les modélisateurs visent avant tout des objectifs opérationnels ou « de terrain », ce résultat apparaissant contraire aux conclusions précédentes.

Y aurait-il alors contradiction entre les objectifs annoncés par les chercheurs et la réalité effective de la modélisation dans la recherche publique française ? Pour ajouter à la confusion, on peut également citer les résultats concernant l'analyse des problématiques qui ont conduit au développement du modèle : on modélise pour comprendre les phénomènes (notamment dans le pôle physique) ou pour innover dans un domaine de connaissance, pour satisfaire une nécessité stratégique ou politique, ou encore pour prévoir, calculer en général et assister la conception de projets en particulier. Parmi ces diverses problématiques, les premières sont d'ordre scientifique tandis que les autres ont un caractère plus stratégique ou opérationnel.

Pour lever ces ambiguïtés, on est conduit à penser qu'il existe deux modalités d'application opérationnelle des modèles : en premier lieu, l'opérationnalité « in vitro » (au laboratoire) qui conduit les chercheurs, sous diverses modalités de contrats d'étude ou de convention avec leur laboratoire, à faire bénéficier les praticiens du champ urbain des compétences de leur modèle, notamment à des fins de diagnostic et de simulation. Dans ce contexte, ce n'est pas tant l'outil lui-même que les résultats qu'il produit qui constituent l'enjeu opérationnel de la modélisation. Le modèle satisfait alors ses auteurs chercheurs comme il peut satisfaire les praticiens, utilisateurs potentiels de ses résultats. Sa diffusion n'est pas strictement nécessaire à son application opérationnelle.

De l'autre côté, un autre mode d'opérationnalité consiste en la diffusion effective du modèle comme outil, susceptible d'être mis en oeuvre hors du laboratoire et par d'autres que ses concepteurs. L'enjeu opérationnel est alors l'outil logiciel lui-même, dont les auteurs ne contrôlent plus les mises en oeuvre potentielles ni l'appropriation par les utilisateurs finaux. L'adaptation éventuelle de l'outil ainsi que la formation des utilisateurs potentiels sont alors intimement associée à l'opérationnalité du modèle.

Ces deux modalités d'application opérationnelle, qui mettent en évidence d'un côté des « modèles-outils » diffusés et appropriés hors des sphères de la recherche, et de l'autre des « modèles d'expertise » utilisés au laboratoire pour des applications ponctuelles, recoupent par ailleurs bien les pôles de compétences du champ urbain. Ainsi, si l'on analyse la diffusabilité des modèles, c'est-à-dire leur existence sous la forme de logiciels diffusables, on observe que les modèles du pôle physique sont en moyenne beaucoup plus souvent diffusables que ceux du pôle géographie. Par ailleurs, la diffusabilité ne semble pas liée à l'âge du modèle si bien que l'on ne peut invoquer l'expérience ou l'effet du temps pour expliquer les différences constatées. De même, la diffusion effective des modèles (nationale ou internationale) et l'existence d'un club d'utilisateurs, sont des réalités plus prononcées dans le pôle physique que dans le pôle géographie. L'on développerait plus facilement des modèles « pour soi » (non diffusables) dans le pôle géographie, et des modèles diffusables « pour les autres » dans le pôle physique.

Les deux modalités d'opérationnalité des modèles seraient donc plus ou moins propres aux cultures scientifiques et pratiques des domaines. On peut encore étayer cette hypothèse en remarquant qu'il existe dans le pôle géographie (mais aussi dans le pôle physique) un nombre important de modèles effectivement diffusés mais en pratique réputés non diffusables (ils n'existent pas sous la forme de logiciels diffusables). Il peut s'agir de modèles de laboratoire, échangés entre chercheurs mais dont la finalité n'est pas proprement d'être distribués vers des utilisateurs non experts. Ainsi, diffusion et opérationnalité ne sont pas des critères parfaitement symétriques en matière de modélisation urbaine.

6.2.3 Capacités et limites opérationnelles des modèles

Les modèles recensés sont-ils opérationnels ? Lorsque l'on pose la question de manière directe aux auteurs, ceux-ci répondent par la positive dans leur très grande majorité, si bien que l'on est conduit à penser que l'acceptation de la notion d'opérationnalité est assez floue dans le champ urbain : derrière ce terme, les auteurs veulent-ils seulement faire savoir que leur modèle fonctionne effectivement en tant qu'outil logiciel, ce que ne feraient pas les quelques rares modèles réputés non opérationnels ?

Pour qualifier plus précisément le degré d'opérationnalité des modèles, nous pouvons et devons nous appuyer sur les deux modes d'application opérationnelle mis en évidence au chapitre précédent : un premier mode dans lequel l'enjeu opérationnel est le modèle en tant qu'outil logiciel (qu'il s'agit alors de rendre accessible à ses utilisateurs potentiels), et un deuxième mode où l'enjeu n'est pas tant le modèle (qui reste un outil de recherche) que les résultats qu'il peut produire lorsqu'il est mis en oeuvre au laboratoire, sur une application concrète et à des fins d'expertise ou de consultance. Le mode de type « modèles-outils » est mieux représenté dans le pôle physique, tandis que les « modèles d'expertise » semblent plus spécifiques au pôle géographie.

Dans ce contexte, les critères liés à l'opérationnalité doivent être dissociés suivant les deux logiques d'application des modèles. Certains éléments sont communs aux deux approches, comme le niveau de validation du modèle, ses limites actuelles ou encore le temps nécessaire pour sa mise en oeuvre. Les critères plus spécifiques aux « modèles-outils », parmi ceux que nous avons analysés, concernent quant à eux le niveau d'utilisabilité du modèle, le temps de

formation nécessaire, la documentation disponible ou encore les matériels et systèmes supports du modèle.

• Critères communs

Parmi les critères communs aux deux approches, le niveau de validation est sans doute l'un des plus fondamentaux pour juger de l'opérationnalité des modèles, dans la mesure où il permet d'affecter un degré de confiance à ces outils. L'ensemble des modèles recensés présente un niveau de validation relativement élevé, notamment dans les domaines du pôle physique, avec près des 2/3 des modèles validés définitivement ou presque. Dans les domaines du pôle géographie, les modèles présentent majoritairement une validation dite partielle, terminologie ambiguë qui recouvre des situations très diverses. Ainsi, la validation peut être partielle parce qu'effectuée seulement pour des situations géographiques et temporelles particulières (la majorité des situations recensés) ou bien sur certains cas théoriques, ou encore parce qu'une partie seulement du modèle est validée. Cette notion de validation partielle peut être considérée comme une catégorie euphémistique lorsque le travail de validation n'est pas réellement achevé. On nuancera cependant ces conclusions en remarquant que la validation d'un modèle ne présente pas la même portée ni la même difficulté dans les deux pôles : on peut ainsi supposer que dans certains domaines du pôle géographie, la validation partielle est le meilleur niveau accessible compte tenu des connaissances ou de la complexité des phénomènes représentés. A l'inverse, dans certains domaines du pôle physique, les modèles partiellement validés aujourd'hui sont susceptibles d'être validés complètement à court terme. On notera d'ailleurs que le niveau de validation partielle est fortement représenté dans les modèles issus d'organismes institutionnels, dont les résultats ne peuvent être supposés produits trop légèrement.

Il faut par ailleurs remarquer que dans tous les domaines, plusieurs obstacles viennent compromettre le travail de validation. Ceux-ci sont liés en grande partie aux données disponibles (absence des données utiles, difficultés d'acquisition in situ, problèmes de correspondances entre les données disponibles et les entrées du modèle, forte sensibilité du modèle à la qualité des données, etc.), au nombre important de paramètres à contrôler dans le modèle, ou encore à la nature même du modèle dans son état actuel. Mais un modèle non validable est-il encore un modèle ?

De manière plus optimiste, on retiendra que le calage ou la calibration des paramètres du modèle, par comparaison avec des situations observées ou les résultats d'expériences de laboratoire, ou encore par des approches de type « benchmarking », font l'objet d'un travail qui (lorsqu'il est signalé, c'est-à-dire pour une minorité de modèles), semble important. On retiendra également que le niveau de validation est parfaitement corrélé à l'âge des modèles et que, par ailleurs, les modèles les mieux validés sont également les mieux diffusés et donc les plus accessibles.

Un autre critère d'appréciation de l'opérationnalité des modèles dans leur ensemble peut être obtenu au travers des limites que leurs auteurs décrivent quant à la mise en oeuvre de leurs modèles. Certains modèles admettent des limites intrinsèques à la modélisation ; elles sont par exemple relatives à des problèmes non encore résolus. D'autres limites résultent du fait que certaines hypothèses ou méthodes de calcul n'ont pas encore été validées, ce qui renvoient aux analyses précédentes ; moins permanentes, elles peuvent être levées à moyen terme. Certains modèles enfin (une majorité parmi ceux qui répondent) mettent en avant des limites opérationnelles résultant de difficultés pratiques dans l'utilisation du modèle. L'existence de ces limites pratiques semble fortement corrélée au mode d'opérationnalité de type « modèles d'expertise » tel que nous l'avons présenté plus haut.

Là encore, on apportera quelques touches encourageantes à ces propos en remarquant que, même limités, les modèles recensés ont fait l'objet de nombreuses applications pratiques dans un grand nombre de situations réelles, à des fins d'études et de projets notamment. L'opérationnalité annoncée est donc au moins en partie confirmée par les faits. Par ailleurs,

prompts à dépasser les limites actuelles de leur production, les chercheurs sont très prolixes lorsqu'on les interroge sur les perspectives envisagées pour améliorer leur modèle. La motivation pour la poursuite du travail entamé est très sensible. Outre cette motivation, les résultats laissent également penser que les chercheurs restent insatisfaits de leur production, puisque la grande majorité des modèles appellent des travaux d'extension, de modification, d'optimisation, d'amélioration ou encore de validation et de calibration. Ainsi, il semble que du point de vue du modélisateur, le travail de modélisation est toujours en chantier : un modèle n'est jamais définitif selon ses auteurs, et ces derniers semblent par ailleurs savoir précisément dans quelles voies diriger leurs travaux pour améliorer les modèles actuels.

Enfin, au chapitre des critères communs, si l'on considère le coût de production de résultats comme un facteur opérationnel décisif, alors le temps nécessaire pour la mise en oeuvre des modèles apparaît comme un élément important d'appréciation de l'opérationnalité de ces outils. Tous domaines confondus, la phase d'acquisition et de préparation des données est la plus lourde, mobilisant plusieurs jours pour la grande majorité des modèles, et au moins plusieurs heures pour 90 % d'entre eux. Cette étape demande rarement moins d'une heure, et jamais dans les domaines des transports et des réseaux par exemple. Au contraire, l'étape de résolution apparaît généralement très rapide, bien que l'on constate des variations entre les domaines ou même au sein de chaque domaine ; ainsi, le domaine des réseaux techniques est partagé entre des modèles à résolution rapide (de type « temps réel », moins d'une heure) et d'autres à résolution très lente (plusieurs jours). L'étape de post-traitements et d'analyse des résultats est quant à elle plus variable : très rapide pour plus de la moitié des modèles du domaine des réseaux techniques (moins d'une heure, cf. remarque précédente) et au contraire plutôt longue pour la même proportion des modèles en géographie (plusieurs jours). Globalement, les modèles du pôle géographie demandent une interprétation longue (sans doute parce que délicate) tandis que ceux du pôle physique seraient, toutes proportions gardées, plus faciles à interpréter.

Nous avons extrapolé ces résultats pour constituer trois catégories de modèles : les modèles « lourds » dont la mise en oeuvre demande plusieurs heures, dans le meilleur des cas, pour chacune des trois phases et plusieurs jours le plus souvent ; l'utilisation de ces modèles est un travail de longue haleine ; les modèles « légers » pour lesquels aucune phase d'application ne demande plusieurs jours, si bien que la mise en oeuvre complète du modèle peut être envisagée en moins d'une journée ; les modèles « hybrides » dont la mise en oeuvre alterne des phases rapides et des phases lourdes (par exemple, la préparation des données peut exiger plusieurs jours, pour une résolution et une interprétation rapide des résultats ; dans d'autres cas, les résultats produits très rapidement demandent une interprétation longue). Les modèles lourds forment plus de la moitié des modèles recensés et ils se répartissent dans la même proportion au sein de chaque domaine. Les modèles légers constituent une minorité dans tous les domaines, à l'exception du domaine des transports dans lequel aucun modèle de ce type n'existe. On remarque que les organismes institutionnels produisent exclusivement des modèles lourds, de même que la majorité des organismes privés. Par ailleurs, il n'existe aucune relation entre la lourdeur et l'âge du modèle, autrement dit les modèles ne semblent ni « s'alourdir » ni « s'alléger » avec le temps. De plus, la lourdeur n'est pas un handicap pour ce qui concerne la diffusabilité du modèle. Par contre, plus un modèle est lourd, plus il s'adresse à un public de type « expert ». Le temps de formation au modèle étant corrélé au niveau d'utilisabilité, on peut supposer que plus lourd est le modèle, plus long est également le temps de formation nécessaire pour le manipuler.

• Critères spécifiques aux « modèles-outils »

La validation, les limites opérationnelles et le temps de mise en oeuvre forment des critères d'évaluation de l'opérationnalité communs à tous les modèles. Les « modèles-outils », c'est-à-dire les modèles susceptibles d'être mis en oeuvre hors du laboratoire et par d'autres que les chercheurs qui les ont développés, ont des exigences d'opérationnalité qui intègrent d'autres éléments. Ce sont par exemple, parmi ceux que nous avons étudiés, le niveau d'utilisabilité et le temps de formation au modèle, la documentation disponible, ou encore les types de

systèmes et matériels supports du modèle. Nous avons analysés ces critères pour l'ensemble des modèles, faute d'une segmentation définie nous permettant de classer les modèles par type d'opérationnalité. Cependant, les résultats doivent systématiquement être relativisés en considérant les ensembles implicites des modèles-outils et des modèles d'expertise.

Le niveau d'utilisabilité des modèles est une notion relative par laquelle nous classons les utilisateurs potentiels de ces modèles en trois catégories plus ou moins floues que nous nommons expert, public informé et tout public. Tous domaines confondus, plus de la moitié des modèles recensés ne sont utilisables que par des experts du domaine. Ce fait est encore plus prononcé dans les domaines des transports, des risques et de la géographie. Cependant, on remarque que le niveau d'utilisabilité est bien corrélé à la diffusabilité du modèle, si bien que plus les modèles sont diffusables (en moyenne), plus ils s'adressent à un public généraliste. Inversement, les modèles n'existant pas sous la forme de logiciels diffusables s'adressent majoritairement à un public expert. Les auteurs de modèles-outils semblent donc savoir s'adapter à leur public. On peut ainsi supposer qu'un modèle développé pour être diffusé fait l'objet d'une plus grande attention en matière d'accessibilité, ou encore que la diffusion effective du modèle entraîne, par retour des utilisateurs, une amélioration de son accessibilité.

Par ailleurs, plus le modèle est accessible et moins long est le temps moyen de formation. Ainsi, la moitié des modèles réputés « tout public » sont abordables en moins d'une journée. A l'inverse, près de la moitié des modèles d'experts nécessitent au minimum quelques jours de formation, voire plusieurs semaines ou plusieurs mois. On note également que le temps de formation n'est pas précisé (et supposé inconnu) pour plus de la moitié des modèles du pôle géographie tandis que seuls 15 % des modèles du pôle physique sont dans ce cas. On retrouve ici les différences de modalité opérationnelle des modèles suivant les pôles. Ainsi, les modèles du pôle géographie sont plus souvent des outils de laboratoire utilisés par des chercheurs à des fins d'expertise ; la formation au modèle semble secondaire dans ce processus. Au contraire, les modèles du pôle physique sont plus souvent destinés à un public généraliste, exerçant hors du laboratoire et supposé moins informé des techniques de modélisation ; il importe alors de maîtriser non seulement la diffusion du modèle, mais aussi la formation de ses utilisateurs potentiels. Dans cette situation, la diffusion, la formation ainsi que le niveau d'utilisabilité des modèles forment des critères interdépendants et susceptibles de gager la pertinence opérationnelle des outils proposés à l'utilisation.

La même segmentation est visible pour ce qui concerne le niveau de documentation des modèles. En effet, bien que tous domaines confondus, plus de 40 % des modèles recensés présentent un bon niveau de documentation, ce niveau est globalement très élevé pour les modèles du pôle physique et beaucoup plus faible dans ceux du pôle géographie. Nos remarques précédentes concernant le temps de formation semblent donc pouvoir s'appliquer identiquement pour ce qui est de la documentation : nécessaire à la diffusion des modèles-outils hors du laboratoire, elle apparaît secondaire pour les modèles d'expertise mis en oeuvre par leurs auteurs. On remarque cependant que, contrairement à ce que l'on observe pour la validation, près d'un modélisateur sur dix reconnaît que la documentation du modèle est inexistante. Ce point pose question lorsque l'utilisation du modèle est essentiellement le fait de ses auteurs qui en connaissant intimement la structure et le fonctionnement. Sans documentation établie, cette connaissance peut être rapidement perdue et le développement du modèle, sa validation lorsqu'elle est inachevée, voire sa pérennité, peuvent en être affectés. On note néanmoins que, tous domaines confondus, le niveau de documentation et celui de validation sont fortement corrélés : les modèles bien documentés sont également bien validés. Inversement, les modèles dont la documentation est succincte, voire en cours d'élaboration, ont un niveau de validation plus faible. La documentation est d'autant mieux établie que la validation est probante, celle-ci étant elle-même fonction de l'âge du modèle. Ainsi, en moyenne, les modèles bien validés et documentés seraient plutôt à rechercher parmi les plus anciens.

Enfin, les problèmes relatifs aux matériels et systèmes supports des modèles ne semblent pas constituer d'obstacle opérationnel majeur. En effet, les modèles se satisfont d'un ordinateur

personnel ou d'une station de travail dans leur grande majorité, bien que certains modèles du pôle physique ou du domaine des morphologies urbaines exigent un matériel plus puissant (dans ces domaines seulement, la puissance de calcul est une des motivations principales pour le choix du matériel). Les modèles utilisent peu de périphériques coûteux et ils sont également développés sur des systèmes classiques, Unix prédominant dans le pôle physique et Windows dans le pôle géographie. On peut rapprocher ces résultats de l'âge moyen des modèles dans les deux pôles ainsi que de la forte progression des modèles dans le pôle géographie depuis 1995, que nous avons reliée au développement rapide des ordinateurs personnels dans la même période.

Par ailleurs, les modèles sont écrits dans des langages standards (C/C++ et Fortran 77/90 en majorité) mais les développeurs délèguent peu de fonctions de ces modèles à des bibliothèques extérieures, sauf en ce qui concerne l'affichage graphique ou l'interface homme-machine. Pourtant, il est fort probable que des éléments logiciels de la modélisation urbaine communs à plusieurs domaines sont susceptibles d'être standardisés et partagés entre les chercheurs. Ceci suppose cependant qu'existe une communauté de recherches pluridisciplinaires autour de la modélisation urbaine. Celle-ci, comme nous le précisons ci-après, ne semble pas établie aujourd'hui.

6.2.4 Aspects scientifiques de la modélisation urbaine

Quels données, concepts et méthodes sont mis en oeuvre dans les approches de modélisation appliquées à la ville ? Nous avons tenté de proposer quelques éléments d'appréciation des aspects scientifiques de la modélisation urbaine dans la dernière partie de ce rapport. Nos analyses apportent des éclaircissements sur certains aspects généraux et transversaux de la modélisation, mais on retiendra avant tout qu'elles dénotent le plus souvent confusions et ambiguïtés lorsque que l'on rentre dans l'intimité des modèles.

Quelques éclaircissements sont ainsi obtenus sur les questions relatives aux données utilisées par les modèles du champ urbain. On retiendra que ceux-ci font appel à une large gamme de données de toutes natures, tant dans le pôle physique que dans le pôle géographie. Conformément à l'intuition, les modèles du pôle géographie utilisent principalement des données socioéconomiques, relatives à leurs échelles d'appréhension (la ville ou les systèmes de villes). Les modèles du pôle physique mettent en oeuvre des données décrivant les phénomènes en jeu (principalement climatiques) et des descripteurs géométrico-physiques des entités urbaines à l'échelle des fragments urbains. Dans cet ensemble, les données relatives aux transports forment un groupe à part. Cependant, toutes les données utiles aux modèles urbains peuvent être classées en deux catégories : celle des descripteurs spécifiques des entités mises en jeu dans les modèles d'une part, et celle des descripteurs contextuels qualifiant l'environnement urbain dans lequel ces entités agissent d'autre part. Les données conditionnent en partie la validité des résultats, d'autant plus lorsque les modèles sont sensibles à leur qualité ou à leur précision. Par ailleurs, la diversité de ces données, leur quantité importante ainsi que les difficultés manifestes des procédures d'acquisition, expliquent en grande partie les limites opérationnelles et la lourdeur des modèles signalées précédemment, si bien que les problèmes relatifs aux données apparaissent en partie comme un frein à la modélisation.

Pour ce qui concerne la nature des résultats produits par les modèles, on retiendra que bien que les traitements statistiques classiques soient utilisés, les visualisations graphiques de toute nature sont privilégiées, par l'intermédiaire de cartographies, de graphes divers (courbes et profils), d'images de synthèses ou encore d'animations. Cette utilisation importante des potentialités d'expression graphique semble spécifique à la forte composante spatiale des modèles urbains.

Un autre élément de clarification des approches de modélisation concerne la dualité entre modèles de connaissance et modèles de fonctionnement. Les deux types de modèles sont représentés de manière équilibrée dans l'inventaire et l'on note que, contrairement à l'intuition ou à certaines idées reçues, l'appartenance à l'une des deux catégories n'est pas liée à l'âge du modèle, ni à sa diffusabilité, ni à son échelle d'application, ni encore au niveau de validation. Cependant, on constate que le pôle géographie présente une majorité de modèles de fonctionnement tandis que le pôle physique se démarque par une majorité de modèles de connaissance. La capacité à développer tel type de modèle dans tel domaine dépend naturellement de l'état des connaissances de ce domaine. De ce point de vue, on peut considérer qu'il est plus facile de construire un modèle de connaissance dans les domaines des sciences exactes, où la connaissance des phénomènes semblent plus univoque et mieux formalisée, que dans ceux des sciences sociales où la connaissance relève parfois de l'hypothèse permanente. C'est du moins ce que laissent supposer nos résultats et ceux-ci semblent confirmer la pertinence de la dualité entre modèles de connaissances et modèles de fonctionnement pour qualifier les approches de modélisation dans le champ urbain.

Par ailleurs, le choix de développement d'un type de modèle, s'il est subordonné en partie à l'état des connaissances du domaine traité, est également dépendant des objectifs assignés à la modélisation. Moins arbitraires même si plus lourds, les modèles de connaissances sont plus souvent mis en oeuvre à des fins de compréhension des phénomènes, notamment dans le pôle physique. A l'inverse, on préfère parfois un modèle de fonctionnement pour un objectif pratique de prédiction et d'aide à la décision, notamment parce que ces modèles semblent plus faciles à mettre en oeuvre en situation opérationnelle, en particulier parce que plus « légers » dans les phases d'acquisition et de préparation des données. Ces résultats pourraient expliquer pourquoi les organismes dits institutionnels, plus souvent confrontés au terrain, développent majoritairement des modèles dits de fonctionnement.

Hormis ces enseignements généraux, de nombreux autres points restent confus sur les aspects scientifiques des modèles urbains, notamment lorsque l'on aborde certains des points les plus fondamentaux de la modélisation : les hypothèses et principes de formalisation, la construction du modèle ou les méthodes de résolution mises en oeuvre. L'on entre ici dans l'intimité des modèles et au coeur des techniques de modélisation, dans une sorte de territoire réservé des modélisateurs dont la langue apparaît bien souvent obscure et à caractère initiatique.

Ainsi, lorsque l'on examine les hypothèses utilisées dans les modèles, on est surpris par le caractère ésotérique des réponses et par l'ampleur du « jargon scientifique » utilisé. Il semble que les réponses à ce type de question ne soient pertinentes qu'au sein d'une communauté scientifique réduite qui ne recouvre même sans doute pas l'intégralité d'un seul domaine. De même, les principes de formalisation et les techniques de résolution mis en oeuvre dans les modèles montrent une très grande variété d'approches et de méthodes pour lesquelles le vocabulaire ne semble pas normalisé (méthodes numériques, statistiques, économétriques ou géométriques, théorie des graphes, systèmes multi-agents, modèles objets, optimisation, etc.). On remarque cependant que l'utilisation de méthodes de calcul numérique (éléments, différences ou volumes finis) semble être l'apanage des modèles du pôle physique, tandis que ceux du pôle géographie s'appuient sur des méthodes en apparence plus disparates.

La question de la construction des modèles est également significative d'une ambiguïté sémantique entre les termes phonétiquement et étymologiquement proches « modules » et « modèles ». Ainsi, deux groupes de modèles (au sens donné dans ce rapport) apparaissent : ceux qui sont construits sur la base de sous-modèles, sans que l'on sache si ces sous-modèles constituent des modules ou composants individualisés ; inversement, ceux qui sont construits autour de modules ou composants plus ou moins autonomes, sans que l'on sache si ces composants constituent autant de sous-modèles susceptibles d'être individualisés. Ce résultat nous ramène à la délicate question de la définition d'un modèle.

Enfin, une bonne illustration des confusions et ambiguïtés de toutes sortes qui entourent aujourd'hui les activités de modélisation dans le champ urbain peut être donnée par l'analyse

des familles de modèles. Bien que les modèles recensés soient le plus souvent rattachés à une famille implicite dans laquelle il existe plusieurs modèles comparables, la notion même de famille de modèle varie d'un auteur à l'autre. Pour certains, les familles sont relatives à un courant de pensée ou à une théorie ; pour d'autres, elles semblent plutôt liées à un champ de recherche académique ou à une discipline. Pour d'autres encore, la famille se définit par une méthode particulière de modélisation ou de résolution dans un domaine particulier. Au total, l'inventaire des familles de modèles montre presque autant de familles que de modèles, ce qui traduit bien, selon nous, l'absence de repères, d'un vocabulaire et de concepts communs pour aborder la ville dans son ensemble à travers les modèles. On peut également rapprocher ce fait de l'absence d'une communauté de recherche organisée autour de ces thèmes, si bien que l'analyse globale des modèles urbains se heurte aujourd'hui à des problèmes terminologiques et conceptuels importants.

De manière plus optimiste, on retiendra cependant que plus du tiers des modèles recensés ne sont pas des créations ex nihilo mais résultent au contraire de la filiation d'un ou plusieurs autres modèles développés antérieurement. De même, une partie des modèles recensés ont permis d'engendrer à leur tour d'autres modèles ou sont en passe de le faire. Trois générations de modèles coexistent donc dans l'inventaire, la génération intermédiaire étant naturellement la mieux représentée. Ces filiations de modèle sont pour nous le signe d'une vitalité importante de la modélisation dans les différents domaines de recherche ayant trait au champ urbain, ce que l'on peut rapprocher de l'histoire déjà ancienne des modèles urbains, telle que nous l'avons décrite plus haut. Enfin, au travers des réponses, nous avons identifié près de 50 modèles susceptibles d'être ajoutés à l'inventaire (37 modèles en ascendance, une dizaine en filiation), ce qui porterait l'effectif général des modèles du champ urbain à plus de 110.

6.3 Discussion et perspectives

Nous terminerons ce rapport en proposant quelques éléments de discussion, tant sur la méthode que sur les conclusions proposées dans ce rapport. Au niveau méthodologique, on fera remarquer les limites de l'échantillon de modèles soumis à l'analyse : nous appuyons nos conclusions sur un échantillon de 64 descriptions de modèles, qui peut sembler étroit pour une entreprise comme celle proposée ici. On peut ainsi penser que ce corpus trop réduit n'est pas parfaitement représentatif de la production de modèles aujourd'hui dans le champ urbain.

Toutes les critiques sont recevables à ce sujet. Elles conduisent d'ailleurs à penser qu'un élargissement du champ d'action de l'inventaire, au moins au niveau européen, est nécessaire. Par ailleurs, afin de couvrir au mieux chacun des domaines en y associant les spécialistes de chacun d'eux, des inventaires thématiques ciblés semblent également devoir être entrepris, notamment pour permettre l'analyse scientifique en profondeur des modèles et pour légitimer toute tentative d'évaluation comparative de ceux-ci. Le premier domaine de modélisation qui pourrait être ainsi étudié est celui des transports, dont on a vu qu'il traverse l'ensemble des préoccupations actuelles en matière de modélisation urbaine.

En ce qui concerne la limite de l'échantillon analysé, on fera remarquer qu'un premier dépouillement, effectué « à blanc » sur les 55 premiers modèles inventoriés, ne montre pas de différence notable avec les résultats de ce rapport, au moins pour les principaux d'entre eux. Ceci nous laisse penser que les régularités et les constantes mises en évidence ici pourraient correspondre à des tendances assez profondes de la modélisation urbaine aujourd'hui. Par ailleurs, rares sont les résultats qui semblent aléatoires et la quasi totalité des recoupements convergent vers des explications communes.

Une autre limite importante de la méthode réside dans l'hypothèse de comparabilité des modèles. Ceux que nous avons recensés apparaissent de prime abord très disparates, si bien que l'on est en droit de poser quelques restrictions méthodologiques quant à la véracité de nos analyses transversales qui supposent un échantillon homogène.

Ce problème nous renvoie à la définition même que l'on donne à la notion de modèle. Nous devons constater que la grande majorité des modèles inventoriés correspondent bien à la définition préalable que nous avons proposée pour cette notion au début de ce rapport. Pour autant, dans cet ensemble homogène selon la définition, une grande diversité apparaît. Devions-nous appliquer un filtre à l'entrée de l'inventaire pour décider si tel ou tel système proposé correspond bien à l'idée que nous nous faisons d'un modèle ? Cette hypothèse pose la question de la légitimité duenseur : pouvons-nous évaluer a priori la pertinence de tel ou tel outil dans des domaines que nous connaissons mal ? Les modèles doivent-ils répondre tous aux mêmes principes, structures et objectifs ? Si oui, que peut-on attendre alors de notre entreprise d'inventaire ? Il nous a semblé au contraire que la diversité apparente, qui s'organise bien vite, au travers de l'analyse, en catégories plus nettes, conforte les intentions initiales du projet Inventur.

6.3.1 Vitalité et ambiguïtés des approches de modélisation urbaine

En supposant qu'ils soient méthodologiquement valides, les résultats obtenus par l'analyse des descriptions de modèles permettent de dresser plusieurs constats généraux prêtant à discussion. Nous retiendrons en premier lieu la grande vitalité des approches de modélisation

appliquées à la ville, laquelle cependant ne se traduit pas, pour le moment du moins, par l'existence d'une communauté de recherche bien structurée.

La vitalité des approches de modélisation urbaine peut être aperçue par de nombreux indices. Le premier concerne naturellement le fait même qu'en quelques mois et malgré des moyens d'enquête réduits, 64 modèles couvrant tous les domaines ont été recensés. Par ailleurs, l'analyse montre qu'il existe au moins une centaine de modèles développés ou utilisés en pratique dans les sphères de recherche française. Nous savons par ailleurs d'expérience que ce potentiel peut être significativement augmenté.

On retiendra également que la production de modèles dans le champ urbain est un fait déjà ancien : depuis 20 ans au moins, plusieurs modèles sont produits chaque année dans les différents domaines de recherche relatifs à la ville. Par ailleurs, cette production connaît une évolution importante ces dernières années dans la majorité des domaines, et ce phénomène ne semble pas imputable à la méthode d'inventaire. Ainsi, plus de la moitié des modèles recensés ont été créés ces dernières années (de 1995 à 1999). On doit bien sûr relier cet engouement pour les activités de modélisation à une certaine démocratisation des outils informatiques depuis le milieu des années 90. Les chercheurs ont su s'approprier ces outils pour augmenter leur « productivité » de manière significative, si l'on s'en tient au seul nombre de créations de modèles par année.

Ce dynamisme des approches de modélisation se concrétise également par l'existence de trois générations de modèles dans l'inventaire. Nous avons ainsi identifié des modèles grands-parents, parents et fils, dont l'analyse permettrait de reconstituer une sorte de généalogie de la modélisation depuis la fin des années 70. Par ailleurs, les chercheurs maintiennent des relations internationales qui, pour être faiblement représentées dans l'inventaire, n'en semblent pas moins durables. Des modèles internationaux voient ainsi le jour dans tous les domaines du champ urbain.

Enfin, lorsqu'on les interroge sur les perspectives envisagées pour améliorer leurs modèles, les auteurs confirment leur motivation et la vitalité de leurs travaux en répondant de manière prolixe. Insatisfaits de leurs productions, ils envisagent dans leur majorité des travaux d'extension ou d'amélioration de leurs modèles, et savent précisément dans quelles voies diriger ces travaux. Cet engouement laisse d'ailleurs penser que les moyens affectés au développement des modèles ne suivent peut-être pas toujours les ambitions (ou la passion) de leurs auteurs.

Cependant, cette vitalité ne se traduit pas par l'existence d'une communauté de recherche structurée. La définition même d'un modèle suscite de profonds débats entre chercheurs et force nous est de signaler que nous même, au cours de cette action, n'avons pas été exempt de critiques ou d'interrogations pertinentes à ce sujet.

Ainsi, la capacité d'échange entre chercheurs de différents domaines urbains semble limitée. A la lecture des aspects les plus fondamentaux de la modélisation, on est surpris par le caractère ésotérique des réponses et par l'ampleur du « jargon scientifique » utilisé. De même, le vocabulaire utilisé semble souvent polysémique et des confusions sémantiques importantes restent à lever, par exemple entre les notions de modèle et de module dans la construction d'un système de modélisation. De manière caricaturale, nos interrogations sur l'existence de familles de modèles qui pourraient structurer le panorama actuel de la modélisation urbaine, montre presque autant de familles potentielles que de modèles recensés. La notion même de famille prête à confusion et donne lieu à des interprétations très diverses même si, dans leur majorité, les modélisateurs se reconnaissent dans une famille implicite au sein de laquelle il existe un ou plusieurs modèles connus comparables.

Au total, si les travaux de modélisation semblent bien organisés au sein de chaque domaine, il semble que l'on manque de repères, d'un vocabulaire et de concepts communs, ou encore de méthodes transversales pour aborder la ville dans son ensemble à travers les modèles. Autrement dit, malgré l'expérience acquise, la communauté scientifique des modélisateurs du

champ urbain ne semble pas constituée ou, dans le meilleur des cas, elle n'a pas atteint la maturité suffisante pour envisager la mise en oeuvre de recherches interdisciplinaires abordant la globalité des questions actuellement posées par la demande sociale.

6.3.2 Deux approches du champ urbain et deux logiques de modélisation

L'analyse des distributions par domaines et des affinités réciproques entre les domaines et thèmes nous a conduit à proposer un classement des modèles de l'inventaire en deux pôles disjoints, l'un articulé autour du domaine de la géographie et comprenant les domaines de l'économie et des transports, et l'autre articulé autour du domaine de la physique associé aux domaines des réseaux techniques et des risques. Seuls six modèles parmi ceux recensés échappent à cette dichotomie.

Ce résultat constitue une base de travail qui présente l'avantage de simplifier grandement les analyses en regroupant les modèles de manière homogène. On observe ainsi des oppositions fondamentales entre les deux pôles qui se différencient jusque dans leur manière de répondre au questionnaire. Les modèles du pôle physique proposent en moyenne des réponses plus laconiques, mais aussi plus exhaustives sur la globalité du questionnaire ; à l'inverse, les modèles du pôle géographie présentent des réponses plus discursives dans les champs qui le permettent, mais les réponses sont moins complètes si l'on considère l'ensemble des champs du questionnaire.

De manière plus générale, les deux pôles présentent des différences importantes pour chacun des points suivants au moins :

- **sur les échelles et les dimensions** prises en compte : les modèles du pôle physique appréhendent plus souvent le niveau des fragments urbains en trois dimensions ; ceux du pôle géographie considèrent le champ urbain à l'échelle de la ville et des systèmes de villes, dans une logique généralement cartographique et le plus souvent en deux dimensions ;
- **sur les objectifs** de la modélisation : si la prédiction ou l'aide à la conception sont mises en avant de manière équivalente dans les deux pôles, ceux-ci se distinguent nettement quant à l'importance accordée à l'objectif d'analyse et de compréhension des phénomènes, mieux représenté dans le pôle physique ; il y a là une différence de nature de la modélisation entre les pôles qui mériterait une discussion approfondie ;
- **sur la diffusabilité et la diffusion** effective des modèles : très fortes dans le pôle physique, plus faibles dans le pôle géographie ; de même, le temps de formation au modèle est beaucoup plus souvent précisé dans le pôle physique que dans le pôle géographie ; ces constats nous ont permis d'esquisser deux modes d'opérationnalité bien distincts suivant les pôles (modèles d'expertise et modèles-outils).
- **sur le matériel** support des modèles : le couple PC / Windows domine dans le pôle géographie, par opposition au pôle physique où règne le couple Station de travail / Unix ;
- **sur le niveau de validation** : dans le pôle géographie, la validation est le plus souvent partielle (avec toutes les ambiguïtés attachées à cette notion), tandis que les modèles du pôle physique présentent une validation quasi définitive dans la majorité des cas ;
- **sur la documentation** des modèles : celle-ci est réduite à quelques publications scientifiques dans le pôle géographie, tandis qu'elle est beaucoup plus extensive, en moyenne, dans le pôle physique ;

- **sur le type** des modèles : plus souvent de connaissance dans le pôle physique, et plus souvent de fonctionnement dans le pôle géographie.

Naturellement, on ne se satisfera pas de ces oppositions pour caractériser les modèles urbains dans leur ensemble, notamment parce que les résultats que nous avons présentés dans le corps de ce rapport sur chacun des points ci-dessus présentent quelques subtilités qui échappent au classement binaire. De même, on évitera de se baser sur la distinction par pôles pour séparer les supposés « mauvais » modèles des supposés « bons » modèles (mieux diffusés, mieux validés, mieux documentés, etc.).

Par contre, on pourra utiliser ces oppositions pour mettre en avant deux approches du champ urbain qui organisent deux logiques de modélisation bien distinctes. Nous observons ainsi, d'un côté, des modèles qui s'appliquent aux grandes échelles de la ville, selon des approches cartographiques, et qui permettent par exemple d'évaluer des scénarii de développement urbain à partir d'hypothèses de compréhension des phénomènes posées a priori, notamment sur des principes analogiques (modèles de fonctionnement). Ces modèles se révèlent difficiles à valider et ils restent généralement des outils de laboratoire, peu diffusés et mal documentés ; leurs résultats potentiels peuvent cependant être mis à la disposition des aménageurs et urbanistes qui le souhaitent. Ce sont des modèles d'expertise, que l'on peut supposer applicables à la planification et à l'aménagement des territoires urbains. Ils mettent en jeu de grandes variables géographiques et socioéconomiques et apparaissent liés aux besoins de prévision inhérents à la mise en oeuvre des politiques de planification à long terme.

De l'autre côté, un groupe de modèles opérant sur les petites échelles de la ville, au niveau des bâtiments, des quartiers ou des espaces urbains, le plus souvent dans les trois dimensions de l'espace, mettent en oeuvre les connaissances établies pour satisfaire des besoins de prédiction et d'aide à la décision, mais également pour établir une meilleure compréhension des phénomènes en jeu dans un domaine particulier des études urbaines. Ces modèles-outils sont conçus par des chercheurs et pour des chercheurs, mais ils peuvent être diffusés hors du laboratoire, auprès des responsables et des praticiens de l'espace urbain. Ils semblent plus faciles à valider ; ils sont également bien documentés, ce qui va de pair avec leur diffusion potentielle. On peut supposer qu'il s'agit d'outils d'ingénierie urbaine qui opèrent sur des problèmes ponctuels et bien maîtrisés de construction ou d'aménagement urbain, liés à des besoins de régulation et de contrôle des équipements, de prévention des risques ou de mise en oeuvre des projets urbains à court ou moyen terme.

On le voit, les échelles d'appréhension de la ville et les phénomènes en jeu conditionnent fortement les logiques de modélisation. On peut également penser que la nature des connaissances mises en oeuvre dans les deux pôles n'est pas symétrique. Les modèles du pôle physique semblent appliquer les connaissances scientifiques établies dans ce domaine, pour mieux comprendre certains phénomènes qui, par leur complexité, échappent à l'analyse classique. Le modèle permet alors au chercheur de produire des connaissances dans son domaine de compétence et, lorsqu'il est validé, il peut être diffusé et mis en oeuvre hors du laboratoire.

Les modèles du pôle géographie se basent sur des hypothèses (que l'on appelle alors des modèles théoriques) pour vérifier l'adéquation de ces hypothèses aux faits (ce qui peut expliquer les difficultés de validation, notamment pour les phénomènes complexes). On en déduit que, dans les domaines correspondants, la modélisation n'est pas dérivée de connaissances établies a priori, mais elle constitue en elle-même un moyen de production des hypothèses et de synthèses explicatives. Si celles-ci s'avèrent satisfaisantes, on peut alors considérer le modèle comme valide et le proposer, non pas à la diffusion car il s'agit d'un objet de connaissance difficile à manipuler, mais à l'exploitation pour ceux à qui incombe le rôle de faire des choix d'aménagement à long terme.

Ces résultats peuvent également être interprétés selon le schéma académique séparant sciences sociales et sciences de la nature. Ces deux branches de la connaissance mettent

chacune en oeuvre des approches de modélisation dans leurs domaines, mais elle présentent des cultures scientifiques bien distinctes : des centres d'intérêts différents, des modalités d'appréhension du champ urbain très marquées, des logiques d'action opposées, notamment pour ce qui concerne les formes d'appréhension du savoir (modèles de connaissance versus modèles de fonctionnement) ou la mise en oeuvre opérationnelle des connaissances. Ainsi, les modèles urbains apparaissent fortement pluridisciplinaires, sans que l'on puisse pour autant conclure sur l'existence de réelles synergies interdisciplinaires dans les approches présentées.

6.3.3 Des points de convergence forts

Ces divergences et logiques de modélisation mises à part, on constate enfin, au travers des résultats de l'inventaire, quelques points de convergence forts qui peuvent aider à organiser la communauté des recherches en modélisation urbaine.

Ces convergences concernent en premier lieu les thématiques privilégiées dans les modèles. Ainsi, malgré la grande diversité des disciplines couvertes par les modèles, on a noté que ceux-ci mettent en avant les thématiques directement ou indirectement liées aux questions de transports. Une analyse plus sémantique des réponses montre également que le mot « transport » arrive nettement en tête des termes les plus souvent utilisés, suivi de la notion proche de réseau. Les transports apparaissent ainsi comme une préoccupation transversale de la modélisation urbaine, répondant sans doute en cela aux préoccupations actuelles émanant de la demande sociale, soit dans la structure des réseaux de transports pour ce qui concerne l'aménagement et le développement urbain, soit dans les effets des transports en milieu urbain, dont les principaux sont la pollution atmosphérique et le bruit.

Un autre point de convergence des modèles concerne les objectifs que les chercheurs assignent à la modélisation. Bien que les modalités d'application opérationnelle des modèles soient plurielles et bien différenciées suivant les pôles, comme nous l'avons montré, la très grande majorité des modèles sont dits opérationnels par leurs auteurs. Parallèlement, l'ensemble des chercheurs, tous domaines confondus, place les problèmes de prédiction et d'aide à la décision comme objectifs privilégiés de leurs modèles. Ainsi, tout en participant au mouvement de la connaissance dans les structures classiques de la recherche, les approches de modélisation s'inscrivent également comme des réponses potentielles aux problématiques urbaines actuelles. On note d'ailleurs que de nombreuses applications des modèles en situations réelles sont décrites dans l'inventaire, confirmant la réalisation des ambitions de leurs auteurs et la capacité effective des modèles à satisfaire certains besoins en matière d'études et de projets.

En matière de convergence, on notera également que les matériels et systèmes supports des modèles tendent à s'uniformiser autour des couples Station de travail sous Unix et PC sous Windows. Dans le choix du matériel, la puissance de calcul n'est pas toujours la motivation principale des chercheurs et ce paramètre semble aujourd'hui secondaire, compte tenu de l'évolution des machines. Par ailleurs, les langages utilisés pour le développement des modèles tendent également à s'unifier autour du C++, ce langage accompagne fortement la production des modèles ces dernières années. Parallèlement, nous avons noté que quatre modélisateurs sur cinq sont prêts à diffuser le code de leurs modèles sans restriction. Il existe donc aujourd'hui des potentialités importantes pour le partage de savoir-faire et la création de bibliothèques communes pour le développement des modèles urbains. De tels transferts de connaissances et de compétences pourraient participer à la constitution d'une communauté de recherche autonome et l'on peut supposer par ailleurs que les questions d'interopérabilité des modèles, actuellement posées avec insistance, pourraient également y trouver un début de solution pratique.

Enfin, les convergences s'expriment également au niveau des problèmes rencontrés par l'ensemble des chercheurs dans le développement des modèles. Au premier chef apparaissent les problèmes ayant trait aux données nécessaires en entrée des modèles, qu'elles soient socioéconomiques ou géométrico-physiques. La diversité de ces données, leur quantité ainsi que les difficultés manifestes des procédures d'acquisition (tant sur le plan matériel que du point de vue du coût), expliquent en grande partie les limites opérationnelles et la lourdeur des modèles constatées dans tous les domaines. La convergence des approches au sein d'une communauté de recherche structurée pourrait permettre la collecte et le partage des données utiles. On peut également étayer cette proposition si l'on remarque que l'un des principaux obstacles venant compromettre le travail de validation des modèles est précisément lié aux données disponibles : absence des données utiles, difficultés d'acquisition in situ, problèmes de correspondances entre les données disponibles et les entrées du modèle, forte sensibilité du modèle à la qualité des données, etc.

Ces éléments de convergence réunis, on ne peut que constater que la modélisation peut devenir un projet fédérateur des recherches urbaines et servir à mobiliser une communauté de recherche vivante mais structurée, dans laquelle le vocabulaire et les concepts pourraient être partagés, de même que le savoir-faire acquis dans chaque discipline. Ces ambitions passent avant tout par une meilleure interconnaissance des travaux entre chaque discipline et entre les modélisateurs dispersés dans des communautés scientifiques plus ou moins cloisonnées. L'inventaire des modèles peut contribuer à cet objectif ; si ce ne devait être que son seul résultat, il n'en serait pas moins justifié.

Table des matières

1. Introduction.....	4
1.1 Le projet Inventur	5
• Le questionnaire de description des modèles.....	6
1.2 Bilan général.....	11
1.2.1 Évolution chronologique	11
1.2.2 Liste des modèles recensés.....	12
1.3 Analyse des modèles.....	14
1.3.1 État des réponses.....	14
• Nombre de champs renseignés par modèles.....	14
• Nombre de mots par modèles.....	15
• Nombre de modèles par champ.....	17
• Nombre de mots par champ.....	17
1.3.2 Méthodes d'analyse.....	19
• Avertissements.....	21
1.3.3 Objectifs et plan de ce rapport.....	22
2. Etat des problématiques actuelles de la modélisation	23
2.1 Domaines et thèmes.....	24
2.1.1 Analyse par domaines.....	24
• Principe d'affectation thématique.....	24
• Codification.....	24
• Bilan général.....	25
• Regroupements par domaines.....	26
• Associations remarquables.....	29
• Attractivité réciproque des domaines.....	30
• Construction des pôles.....	31
2.1.2 Analyse par thèmes.....	33
• Hiérarchie générale.....	33
• Analyse sémantique.....	34
• Hiérarchie des thèmes par domaines.....	34
• Thèmes mal représentés.....	35
• Autres thèmes proposés.....	36
2.1.3 Conclusion.....	39
• Sur les domaines.....	39
• Sur les thèmes.....	39
2.2 Évolution temporelle.....	41
2.2.1 Bilan général.....	41
• Antécédents.....	41

2.2.2	Évolution par domaines.....	43
	• Évolution par pôles.....	45
2.2.3	Conclusion	45
2.3	Échelles et dimensions	47
2.3.1	Échelles.....	47
	• Analyse par pôles.....	48
	• Échelles et âge des modèles	48
	• Précisions sur les échelles.....	50
2.3.2	Dimensions spatiales et temporelles	52
	• Dimensions spatiales.....	52
	• Dimensions spatiales par pôles	53
	• Dimensions spatiales et âge des modèles	53
	• Dimensions temporelles	54
2.2.3	Conclusion	55
3.	Motivations des auteurs de modèles du champ urbain	57
3.1	Origine des modèles.....	58
3.1.1	Auteurs.....	58
	• Origine et âge des modèles.....	59
3.1.2	Nationalités.....	61
	• Nationalités par domaines.....	61
3.1.3	Conclusion	62
3.2	Objectifs et problématique	63
3.2.1	Objectifs de la modélisation	63
	• Bilan.....	63
	• Analyse par pôles.....	64
	• Précisions sur les objectifs du projet de modélisation.....	65
3.2.2	Problématique qui a conduit au développement du modèle.....	66
3.2.3	Conclusion	69
3.3	Public visé, diffusion du modèle.....	70
3.3.1	Types d'utilisateurs	70
3.3.2	Diffusabilité et diffusion	71
	• Diffusabilité.....	71
	• Age et diffusabilité.....	72
	• Origine et diffusabilité.....	73
	• Diffusabilité et licence d'utilisation.....	73
	• Diffusion effective.....	74
	• Diffusion par pôles.....	76
	• Age et diffusion.....	77
3.3.3	Conclusion	77
	• Sur le public visé.....	77
	• Sur la diffusion et l'opérationnalité des modèles.....	78
4.	Capacités et limites opérationnelles des modèles	79
4.1	Opérationnalité et utilisabilité.....	80

4.1.2 Opérationnalité	80
• Par rapport à ses objectifs, le modèle est-il opérationnel ?.....	80
• Capacités et limites opérationnelles	81
• Limites temporaires et limites permanentes.....	82
• Perspectives.....	82
• Exemples d'applications	85
4.1.2 Niveau d'utilisabilité	87
• Bilan	87
• Utilisabilité et diffusabilité.....	87
• Temps de formation au modèle.....	88
4.1.3 Conclusion	90
• Sur l'opérationnalité.....	90
• Sur le niveau d'utilisabilité.....	91
4.2 Mise en oeuvre.....	92
4.2.1 Matériel, système et code	92
• Matériel minimum requis	92
• Autres matériels nécessaires, notamment en matière d'acquisition des données.....	93
• Motivations du choix matériel	93
• Système support.....	94
• Autres ressources systèmes nécessaires	95
• Bibliothèques extérieures auxquelles le modèle fait appel.....	95
• Code dans lequel le modèle est principalement écrit	95
4.2.2 Temps de mise en oeuvre	97
• Bilan général	97
• Typologie des profils, lourdeur des modèles	99
• Lourdeur et âge des modèles.....	100
• Lourdeur et diffusabilité.....	100
• Lourdeur et origine.....	101
• Lourdeur et niveau d'utilisabilité.....	101
4.2.3 Conclusion	101
• Sur le matériel et les systèmes.....	101
• Sur le temps de mise en oeuvre	102
4.3 Validation et documentation	104
4.3.1 Niveau de validation du modèle.....	104
• Bilan général	104
• Validation partielle	105
• Problèmes rencontrés lors de la validation	107
• Méthodes de calibration ou de calage.....	108
• Validation et âge des modèles.....	109
• Validation et origine.....	110
• Validation et diffusabilité.....	110
4.3.2 Niveau de documentation du modèle.....	111
• Bilan général	111
• Niveau de documentation et niveau de validation.....	112
• Restriction de diffusion de documentation	113
• Publicité du code	113
4.3.3 Conclusion	114
• Sur la validation.....	114
• Sur la documentation.....	115

5. Aspects scientifiques de la modélisation urbaine 116

5.1 Données et résultats	117
5.1.1 Nature des données en entrée du modèle	117
• Bilan	117
• Typologie.....	118

• Intéropérabilité en entrée.....	119
• Méthodes d'acquisition employées pour les autres données.....	120
• Sensibilité du modèle.....	122
5.1.2 Nature des résultats produits par le modèle.....	122
• Bilan.....	122
• Post-traitements.....	123
• Intéropérabilité en sortie.....	124
5.1.3 Conclusion.....	125
5.2 Concepts transversaux.....	127
5.2.1 Familles de modèles.....	127
• Bilan.....	127
• Autres modèles de la même famille.....	128
• Spécificité du modèle au sein de sa famille.....	131
• Antécédents.....	133
• Filiation.....	133
5.2.2 Modèles de connaissance et modèles de fonctionnement.....	135
• Bilan.....	135
• Précisions des auteurs.....	136
• Connaissance / fonctionnement et diffusabilité.....	138
• Connaissance / fonctionnement et âge des modèles.....	138
• Connaissance / fonctionnement et origine des modèles.....	139
• Connaissance / fonctionnement et objectifs de la modélisation.....	139
• Connaissance / fonctionnement et échelles d'appréhension du champ urbain.....	140
• Connaissance / fonctionnement et niveau de validation.....	141
• Connaissance / fonctionnement et lourdeur des modèles.....	141
5.2.3 Conclusion.....	143
• Sur les familles de modèles.....	143
• Sur la dualité connaissance / fonctionnement.....	144
5.3 Hypothèses et méthodes.....	146
5.3.1 Hypothèses et principes.....	146
• Principales hypothèses.....	146
• Principes de formalisation utilisés dans le modèle, méthodes employées.....	148
5.3.2 Méthodes.....	150
• Construction du modèle.....	150
• Méthodes de résolution.....	152
5.3.3 Conclusion.....	154
6. Conclusion générale et éléments de discussion.....	155
6.1 Contexte et objectifs (rappel).....	156
6.2 Synthèse des conclusions.....	158
6.2.1 État des problématiques actuelles de la modélisation urbaine.....	158
6.2.2 Motivations des auteurs.....	159
6.2.3 Capacités et limites opérationnelles des modèles.....	161
• Critères communs.....	162
• Critères spécifiques aux « modèles-outils ».....	163
6.2.4 Aspects scientifiques de la modélisation urbaine.....	165
6.3 Discussion et perspectives.....	168
6.3.1 Vitalité et ambiguïtés des approches de modélisation urbaine.....	168
6.3.2 Deux approches du champ urbain et deux logiques de modélisation.....	170

6.3.3 Des points de convergence forts 172