

direction
des Affaires
économiques
et internationales

chiffres & analyses

Les documents de travail du SES



Prospective du marché immobilier de bureaux

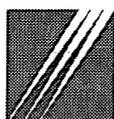
Le modèle SIMIMMO

avril 2003



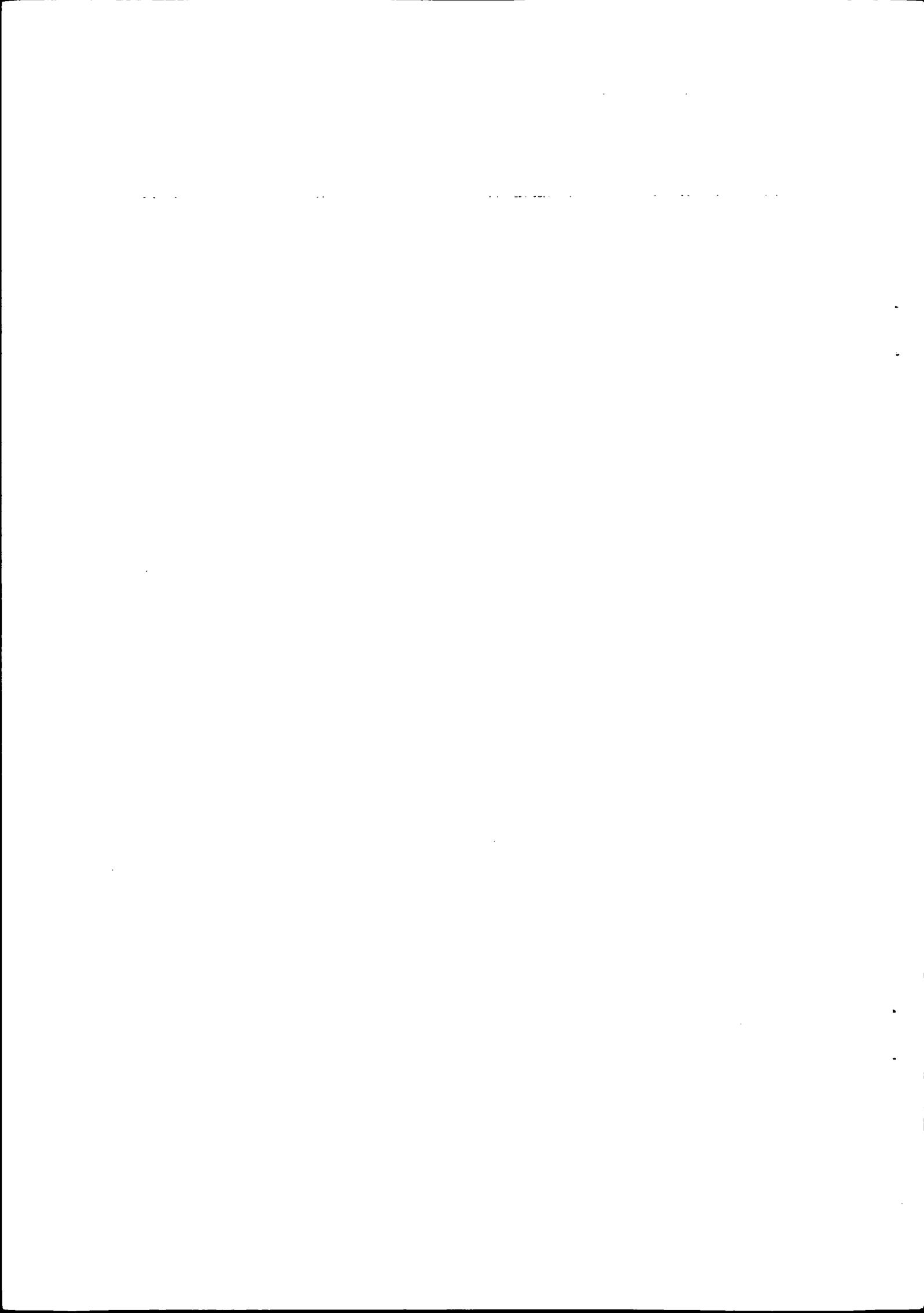
Liberté • Égalité • Fraternité

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE



ministère
de l'Équipement
des Transports
du Logement
du Tourisme
et de la Mer

CDAT
14552



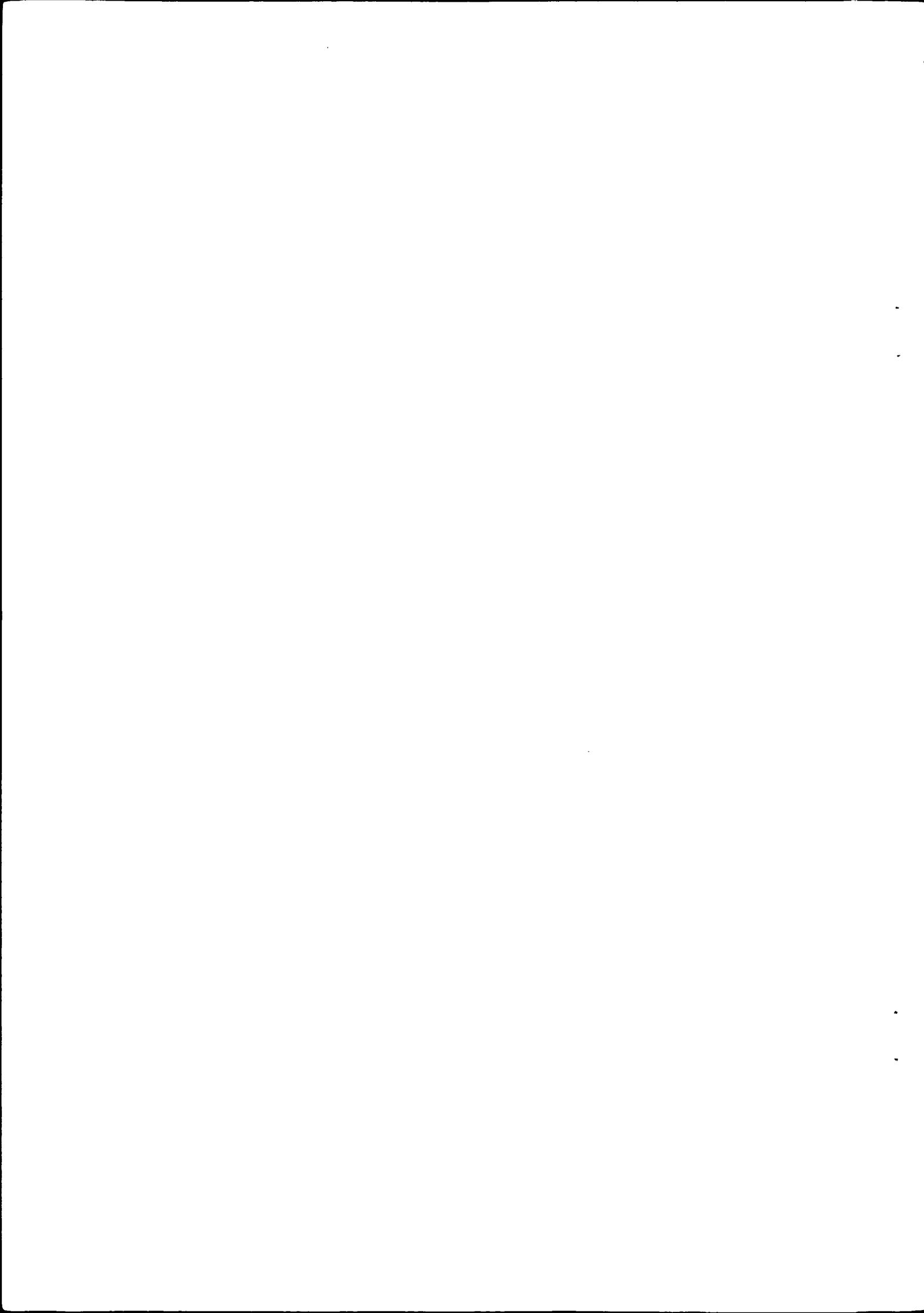
Prospective du marché immobilier de bureaux

Une application de la Dynamique des Systèmes Complexes :

le modèle SIMIMMO

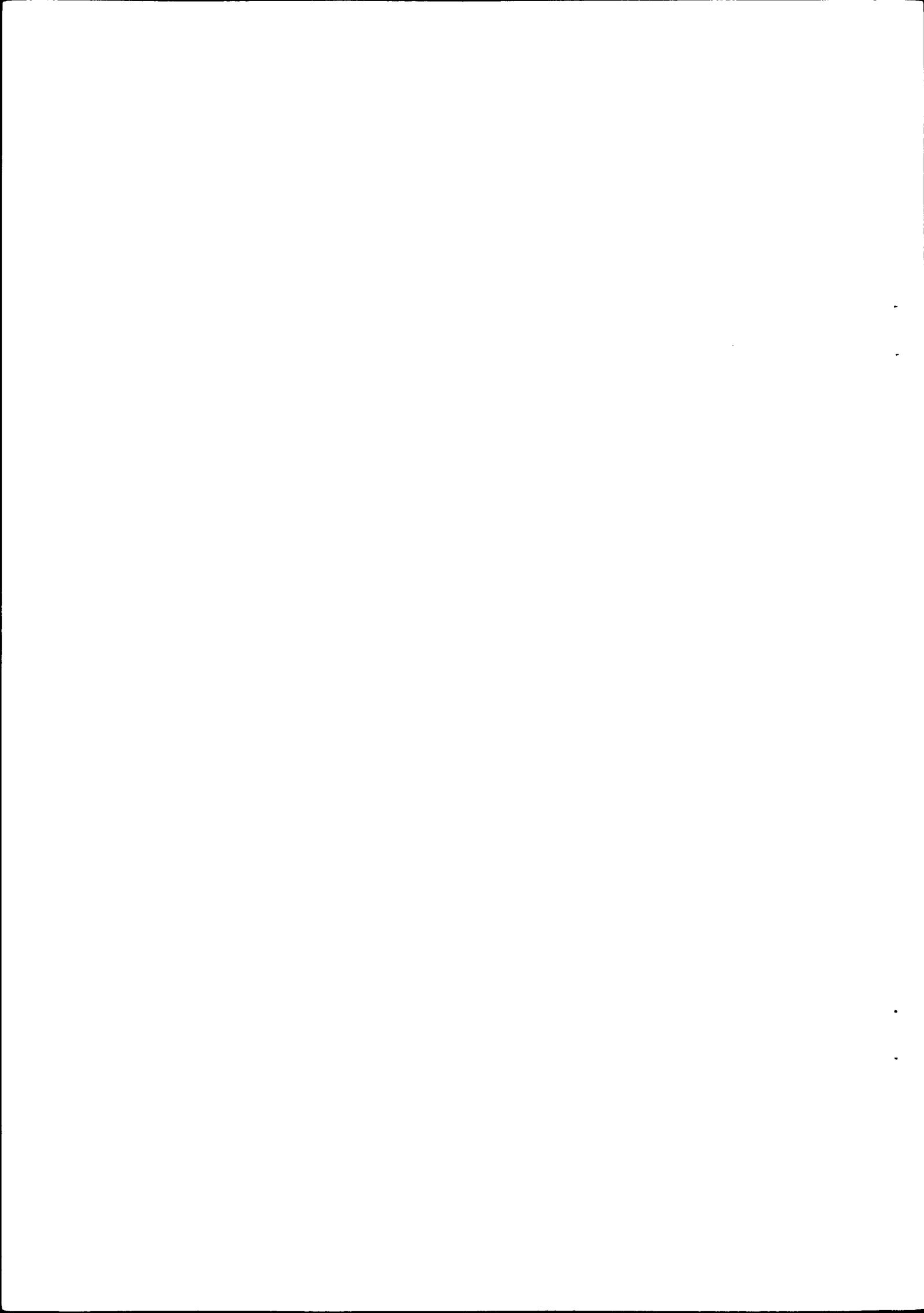


Cette étude a été confiée à Michel KARSKY du cabinet K.B.S. Elle a été menée sous la direction d'Isabelle LEROY-DUTILLEUL et Alain SAUVANT du département des études économiques (DEE) du service économique et statistique (SES)



SOMMAIRE

| | |
|--|----|
| <u>I - Introduction</u> | 4 |
| <u>II - Concepts de base du modèle - définitions</u> | 5 |
| <u>III - Caractéristiques du simulateur</u> | 7 |
| <u>III - 1 - Date d'initialisation et horizon de simulation</u> | 7 |
| <u>III - 2 - Niveaux de présentation et d'utilisation du modèle</u> | 7 |
| <u>IV - Diagrammes causaux</u> | 7 |
| <u>IV.1. - Diagrammes causaux de base</u> | 7 |
| <u>IV.- 2.- Diagrammes causaux (réalisés a posteriori)</u> | 9 |
| <u>IV.-2.1.- Remarques préliminaires</u> | 9 |
| <u>IV.-2.2-. Secteur géographique unique</u> | 10 |
| <u>V – Quelques boucles</u> | 11 |
| <u>V.1 - Boucle stabilisatrice</u> | 12 |
| <u>V.-2 - La comparaison des loyers et le jeu de la concurrence</u> | 13 |
| <u>V.-3 - La croissance économique</u> | 14 |
| <u>V.-4 - Le taux de couverture</u> | 15 |
| <u>VI - Quelques exemples d'analyses de sensibilité</u> | 15 |
| <u>VI.1 - Scénarios de croissance économique</u> | 15 |
| <u>VI.2 - Scénarios d'autorisation de construction de bureaux supplémentaires</u> | 19 |
| <u>VI.3 - Scénario d'accroissement des temps de construction</u> | 20 |
| <u>Annexe 1 : Présentation et mode d'emploi des éléments d'interface du modèle</u> | 22 |
| <u>Annexe 2 : Paramètres d'entrée – variables de sortie</u> | 33 |
| <u>Annexe 3 : Utilisation de simulations comparatives</u> | 35 |
| <u>Annexe 4 : La dynamique des systèmes complexes</u> | 36 |



I - Introduction

Dans un but à la fois prospectif, d'analyse et de compréhension, et aussi d'évaluation de scénarios, le modèle SIMIMMO tend à décrire le fonctionnement du marché de l'immobilier de bureaux dans deux secteurs de l'Ile de France, en appliquant la démarche appelée Dynamique des Systèmes Complexes.

La caractéristique essentielle de cette démarche réside dans la prise en compte de toutes les boucles de rétroaction qui peuvent exister, apparaître ou disparaître, dans le modèle à travers lequel on tend à décrire le comportement temporel d'une réalité donnée.

Les nombreuses variables de ce marché, dont certaines sont comparées historiquement, de 1981 à 2000, aux statistiques disponibles, correspondent à des facteurs que l'on peut assimiler à des forces agissantes dont l'effet, souvent pérenne et périodiquement renouvelé, permet d'oser envisager une analyse prospective des développements du marché.

Deux zones sont considérées :

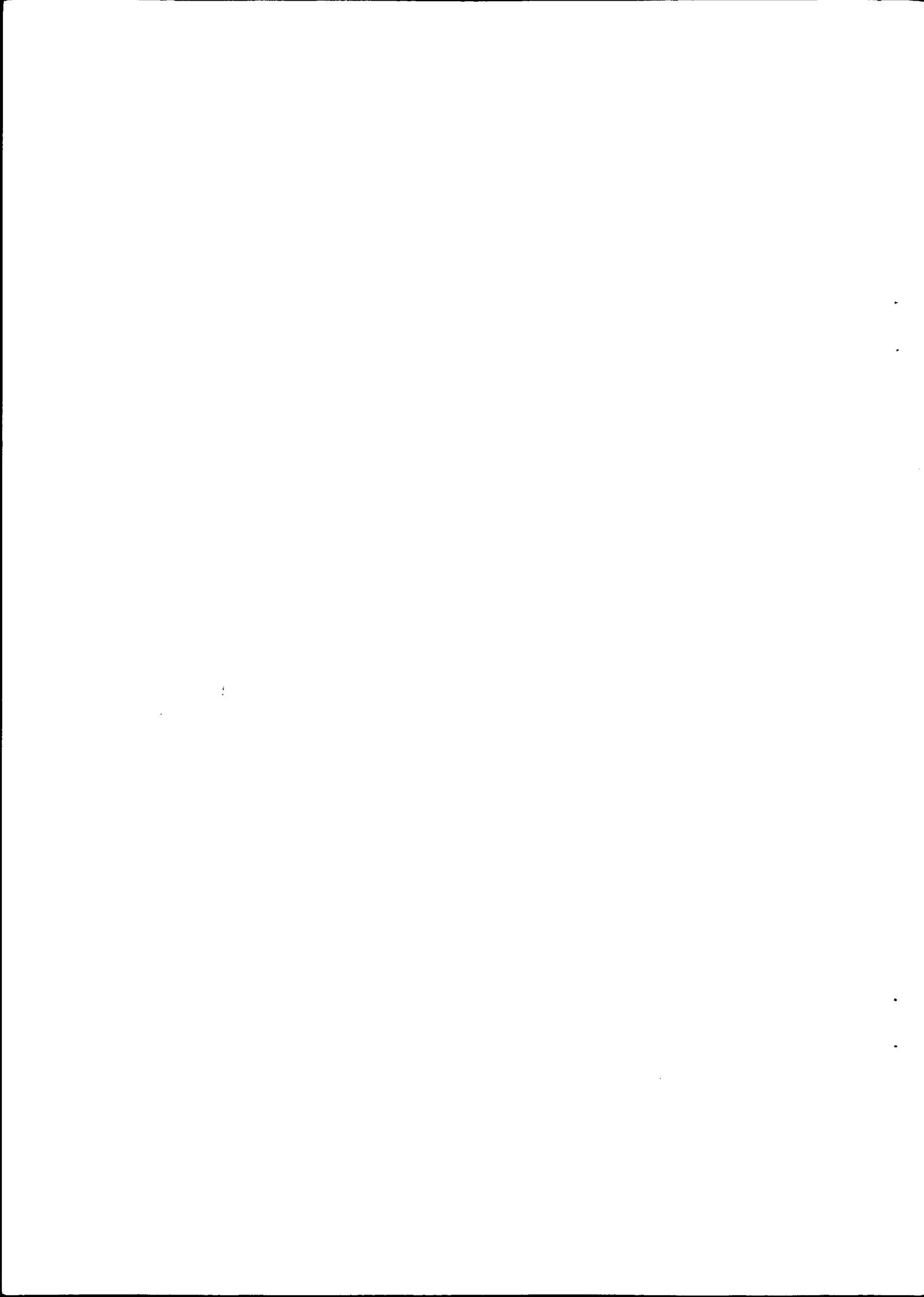
- **Le Quartier Central d'Affaires (QCA)** qui regroupe la cité financière et le triangle d'or.

La cité financière : marché comprenant une partie des 1^{er}, 2^{ème} et 9^{ème} arrondissements. Il est situé entre, à l'ouest, la rue Tronchet, au nord, la rue du Sentier et la rue du Faubourg Poissonnière et, au sud, la rue de Rivoli.

Le triangle d'or : marché comprenant une partie des 8^{ème}, 16^{ème} et 17^{ème} arrondissements. Situé entre, à l'ouest, l'avenue Raymond Poincaré et le boulevard Gouvion St Cyr, au nord, l'avenue de Villiers et le boulevard Malesherbes, à l'est, la rue Tronchet, et au sud, les quais de la Seine jusqu'au Trocadéro

- **Les Hauts de Seine Nord (HSN)** comprenant :

- Courbevoie
- Puteaux
- Levallois-Perret
- Nanterre



II - Concepts de base du modèle - définitions

Les concepts qui ont servi de base à la construction du modèle sont les suivants :

a) - Le marché est régi par le rapport entre le volume de bureaux disponibles pour la location ou l'achat – **l'offre** – et le volume de bureaux recherché – **la demande**. Ce rapport a été appelé dans le modèle **Couverture** ou **taux de couverture**.

On notera qu'il n'y a pas de statistiques disponibles concernant la **demande**. Pourtant, c'est une variable essentielle dans la détermination des prix (loyers).

Le **taux de couverture** diffère donc, en concept et en valeur, du **taux de vacance** pour lequel existent des statistiques. On considérera le taux de vacance comme mesurant un état de fait, le taux de couverture comme une variable causale.

b) - On entend par **prix** les **loyers moyens des bureaux**. Ceux-ci dépendent essentiellement de deux variables, à travers des relations assez complexes mais dont les équations aussi bien que les coefficients ne sont pas modifiés entre 1981 et 2002. Ces variables sont :

- la **croissance économique**, dont l'action se fait sentir à travers la dérivée relative de cette variable,
- la **couverture** (cf. § suivant) dont l'effet se fait aussi sentir à travers sa dérivée relative.

c) - Une variable essentielle à la compréhension du marché, est la **demande** en bureaux, qu'ils soient neufs ou anciens, et pour chaque secteur géographique. Cette demande, pour laquelle il semble ne pas exister de statistiques, et son corollaire le **Carnet de Commande**, influencent les prix des bureaux neufs et anciens à travers la notion de **couverture** : rapport de l'offre - bureaux disponibles - sur la demande. Il n'est pas inutile de répéter que cette couverture peut avoir une valeur très différente du **taux de vacance** - pour lequel les statistiques existent - qui représente le rapport des bureaux disponibles à la totalité des bureaux existants, et qui n'influence pas aussi directement les prix.

La **demande** est influencée par :

- la tendance économique : influence positive,
- l'évolution lente des loyers : influence négative, si les loyers augmentent trop par rapport à ceux des années précédentes, cela ralentit la demande,
- la comparaison avec le loyer moyen du secteur voisin, comparaison qui peut modifier la demande dans chacun des secteurs,
- la vitesse d'évolution des loyers, qui peut créer une variation de demande « spéculative », avec des coefficients de spéculation différents vers le haut (prix croissants) ou vers le bas (prix décroissants)

d) - La situation économique – **l'économie** - influe sur la demande par le jeu notamment des possibilités plus ou moins grande de financement des loyers.

e) - L'**offre** sera, quant à elle, modulée par les **investissements** en bureaux nouveaux ou en **réhabilitation** de bureaux anciens.

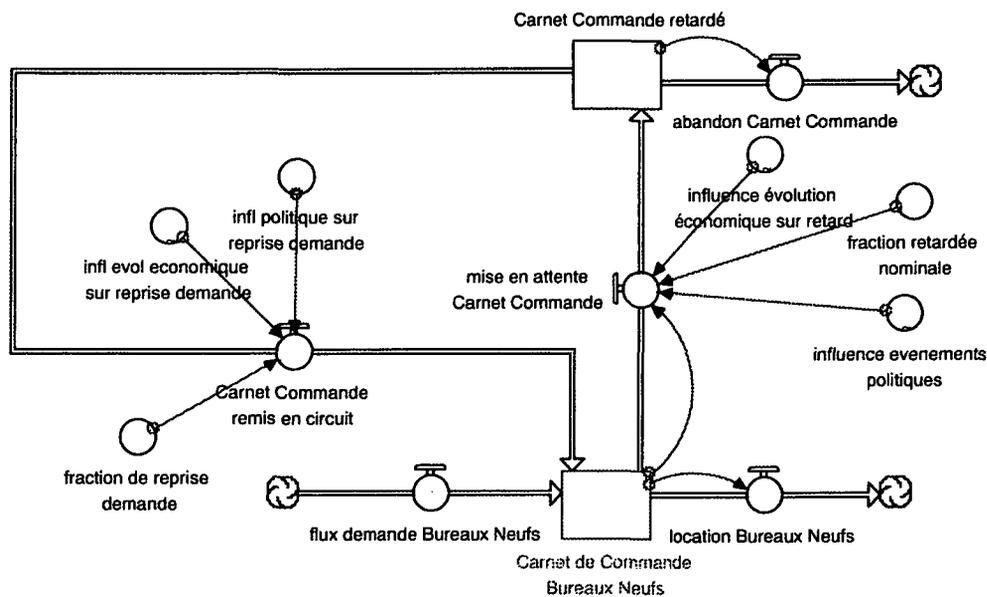
f) - Il existe sur le marché d'une part des **bureaux neufs**, d'autres part des **bureaux anciens**. Les bureaux neufs deviennent à mesure que le temps passe, des bureaux anciens. Ils peuvent alors soit être réhabilités et ré-alimenter le stock de bureaux neufs, soit être transformés en logements et donc sortir purement et simplement du marché.

g) - Les **investissements** correspondent soit à la construction de bureaux neufs dans le secteur Hauts de Seine Nord, soit à de la réhabilitation dans les secteurs Quartier Central d’Affaires et Hauts de Seine Nord, les surfaces disponibles à la construction dans le secteur Quartier Central d’Affaires étant à peu près négligeables (la variable correspondante a été maintenue dans le modèle, mais est pratiquement inactive). La **mise en chantier** - ou la **préparation** à la mise en chantier - est liée à la tendance économique. La relation, et surtout le délai d’influence ne sont pas les mêmes pour le Quartier Central d’Affaires et les Hauts de Seine Nord, et semblent évoluer dans le temps pour des raisons encore inconnues.

h) - Le **Carnet de Commande (CC)** est la demande de location non encore satisfaite. A partir d’un certain seuil du carnet de commande, la demande de bureaux neufs est reportée sur la demande en bureaux anciens.

i) - La **Demande** normalement générée peut être partiellement et temporairement mise de côté en cas de difficultés économiques ou d’évènements politiques, quitte à être remise sur le marché, en tout ou en partie, en cas de reprise économique ou de fin de crise politique. Ce petit sous-modèle de « mise de côté » s’applique à la **demande** en cours, mais aussi au **carnet de commande** en attente.

Le schéma « dynamique » suivant explique le principe d’une telle modélisation.



III - Caractéristiques du simulateur

III - 1 - DATE D'INITIALISATION ET HORIZON DE SIMULATION

Le modèle a été initialisé au 1/01/1981 et, à partir de cette date, tous les calculs sont faits au 1/32^{ème} d'année, soit environ tous les onze jours. L'unité de temps pour l'analyse et la détermination des variables et des unités de mesure, est en effet l'année. L'horizon de simulation, c'est à dire la date d'arrêt de la simulation, est déterminé par l'utilisateur, selon ses besoins et ses désirs d'analyse prospective. L'horizon maximal est 2020

III - 2 - NIVEAUX DE PRESENTATION ET D'UTILISATION DU MODELE

Le modèle SIMIMMO se présente sous trois niveaux qui peuvent être utilisés indifféremment et au choix :

- le niveau supérieur est celui de l'utilisateur, c'est l'interface qui permet à tout utilisateur de réaliser des scénarios prospectifs sans entrer dans le corps du modèle. Les différentes pages de cette interface sont imprimées en annexe ainsi que le mode d'emploi des éléments de cette interface. Certains commentaires destinés à en faciliter l'utilisation, sont présents au sein même de cette interface.

- le niveau intermédiaire est celui du modèle proprement dit, avec ses quelques symboles graphiques spécifiques au langage de simulation STELLA, ses nombreuses flèches d'influence sous-entendant des relations et des équations mathématiques entre variables. Ces équations sont en général très simples (les quatre opérations et quelques relations logiques), la complexité du modèle résidant dans le grand nombre de variables, de relations et surtout de boucles de rétroaction entre variables.

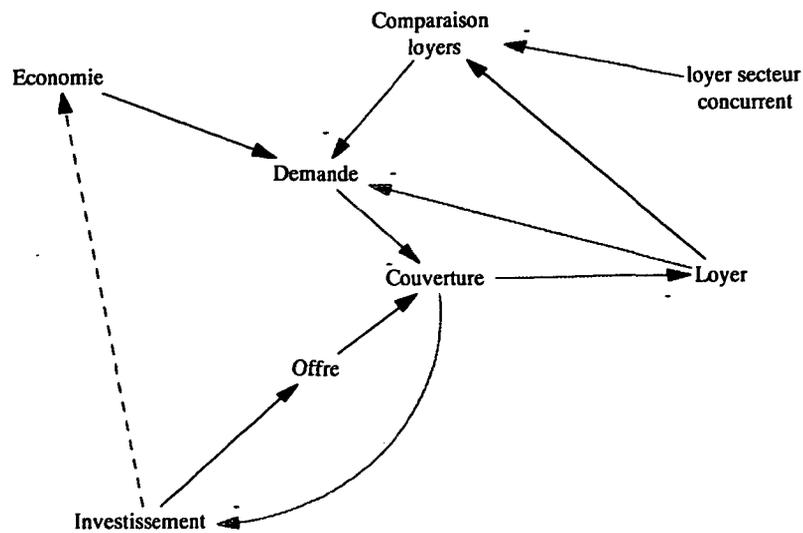
IV - Diagrammes causaux

L'étude a commencé avec un certain nombre de diagrammes causaux qui ont été fournis à l'époque. Dans ce qui suit, nous présenterons quelques diagrammes causaux, allant du plus simple au plus compliqué.

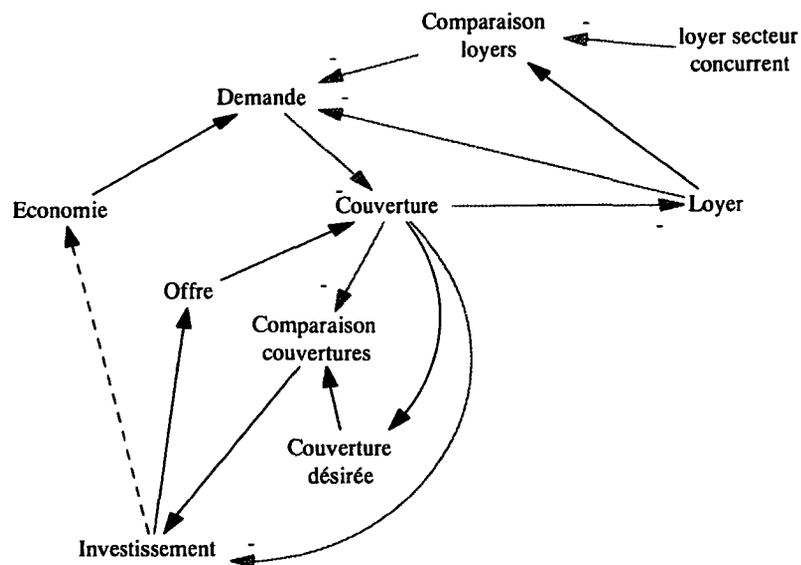
IV.1. - DIAGRAMMES CAUSAUX DE BASE

a) La **Demande** évolue en fonction :

- de l'**économie**
- des **loyers** (en valeur absolue et en variation)
- de la **comparaison des loyers** d'un secteur géographique à l'autre



- b) Les investissements dépendent aussi du niveau de couverture de la demande par l'offre, ainsi que du niveau de couverture souhaitée par les acteurs du marché. La comparaison entre ces deux niveaux de couverture détermine le montant des investissements dans des stocks de bureaux neufs.



- c) Dans le cas où l'économie évolue dans le sens de la récession, ou que des événements politiques inquiètent les opérateurs du marché, il semble – et c'est un scénario dont la possibilité a été retenue dans le modèle – qu'une partie de la **demande** ainsi qu'une fraction du **carnet de commande**, soient reportées à plus tard. Ces variables retardées seront en partie abandonnées, en parties remises en circuit quand la situation économique et/ou politique le justifiera (cf. schéma au §1.i).

IV.- 2.- Diagrammes causaux (réalisés a posteriori)

IV.-2.1.- Remarques préliminaires

Ces diagrammes sont destinés avant tout à faciliter une présentation et une compréhension aussi aisée que possible d'un modèle dont la complexité peut rebuter nombre d'utilisateurs potentiels.

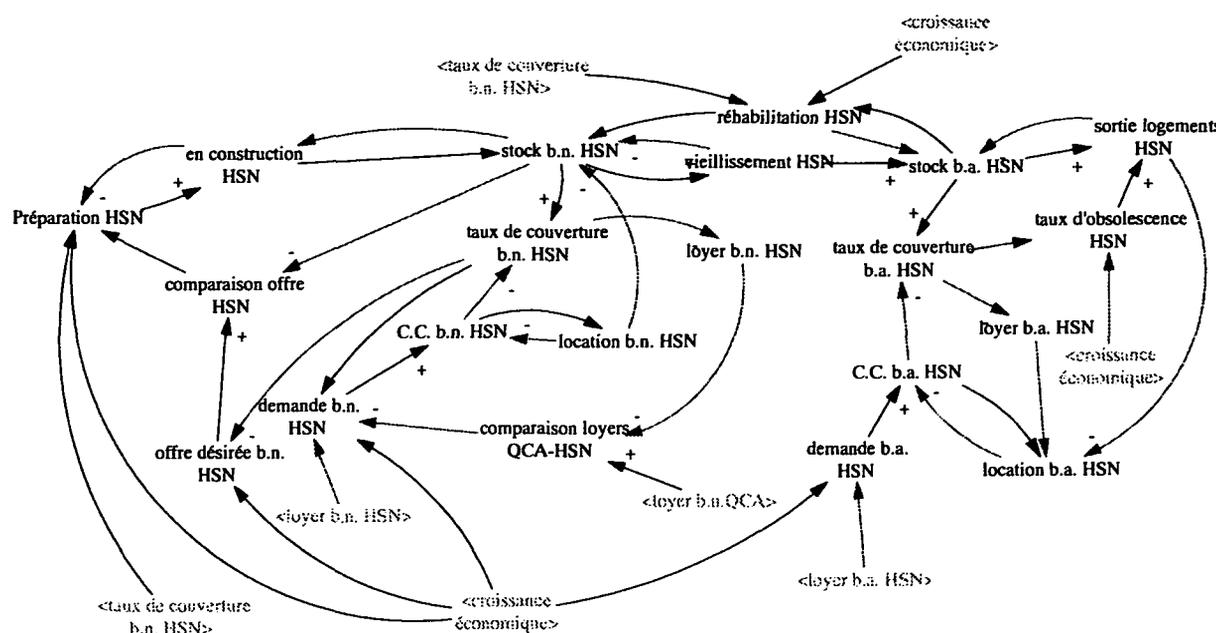
Il est vrai que nos modèles dynamiques sont au moins aussi complexes que la réalité, même s'ils sont réducteurs par rapport à celle-ci.

Il ne faut pas oublier, en effet, que tout modèle dynamique propose un film d'une réalité évolutive, réalité unique dès lors qu'elle est passée, alors que le modèle doit contenir en son sein de nombreuses possibilités d'évolutions possibles, de très nombreux scénarios, d'innombrables bifurcations futures éventuelles. En pratique, seule une fraction du modèle « fonctionne » ou est utile à un instant donné, mais toutes les fractions peuvent être, à tour de rôle, essentielles à certaines époques dans l'intervalle de simulation.

Pour aider à la présentation et faire sentir les causes d'une complexité due avant tout à la présence de très nombreuses boucles de rétroaction, le diagramme causal nous permet de faire ressortir ces boucles, de les analyser, d'en évaluer l'importance qualitative, les constantes de temps ainsi que les interactions possibles entre ces boucles.

On présentera deux schémas, l'un résumant le modèle dynamique pour un secteur géographique, l'autre représentant deux secteurs interconnectés et s'influçant mutuellement. On sera surpris du nombre de boucles contenues dans les schémas proposés. Certaines de ces boucles, en général les plus courtes, sont évidentes et sont, en quelque sorte, automatiques, ne permettant aucune intervention décisionnelle. D'autres, bien que plus longues (mettant en jeu une dizaine de variables causales), peuvent être facilement analysées et parfois modifiées. Enfin certaines boucles, souvent les plus longues, ne sont pas évidentes, sont lentes (grande constante de temps), parfois contre-intuitives. Ces boucles sont souvent « dangereuses » dans la mesure où leurs effets ne se font sentir que bien longtemps après l'apparition puis la disparition des incidents initiaux, à un moment où l'on ne peut plus rien faire, où l'on ne se souvient même pas de ces incidents. Ce sont ces boucles qui justifient le mieux la réalisation et l'exploitation des modèles dynamiques.

Secteur Hauts de Seine Nord (HSN)



V – Quelques boucles

Comme indiqué précédemment, il y a beaucoup plus de boucles lorsqu'on traite deux secteurs en concurrence plutôt qu'un secteur isolé. Par ailleurs, il arrive que l'addition d'une liaison causale augmente fortement le nombre total de boucles.

Par exemple, le schéma ci-dessus concernant un secteur unique, où on a supprimé l'influence des mises en construction ou en réhabilitation sur la croissance économique (influence résumée par l'adage « quand le bâtiment va, tout va »), comporte environ 15 boucles, dont 7 passant par la variable « préparation ». Si l'on tient compte de l'influence, fût-ce-t-elle faible, des chantiers de BTP sur l'économie, on double aisément le nombre de boucles, puisque rien que par la variable « en construction » passent 17 boucles.

Si maintenant on a 2 secteurs avec des éléments de concurrence entre eux (comparaison loyers), on trouve environ 40 boucles au sein du diagramme causal correspondant, 22 boucles passant par la seule variable « Préparation ».

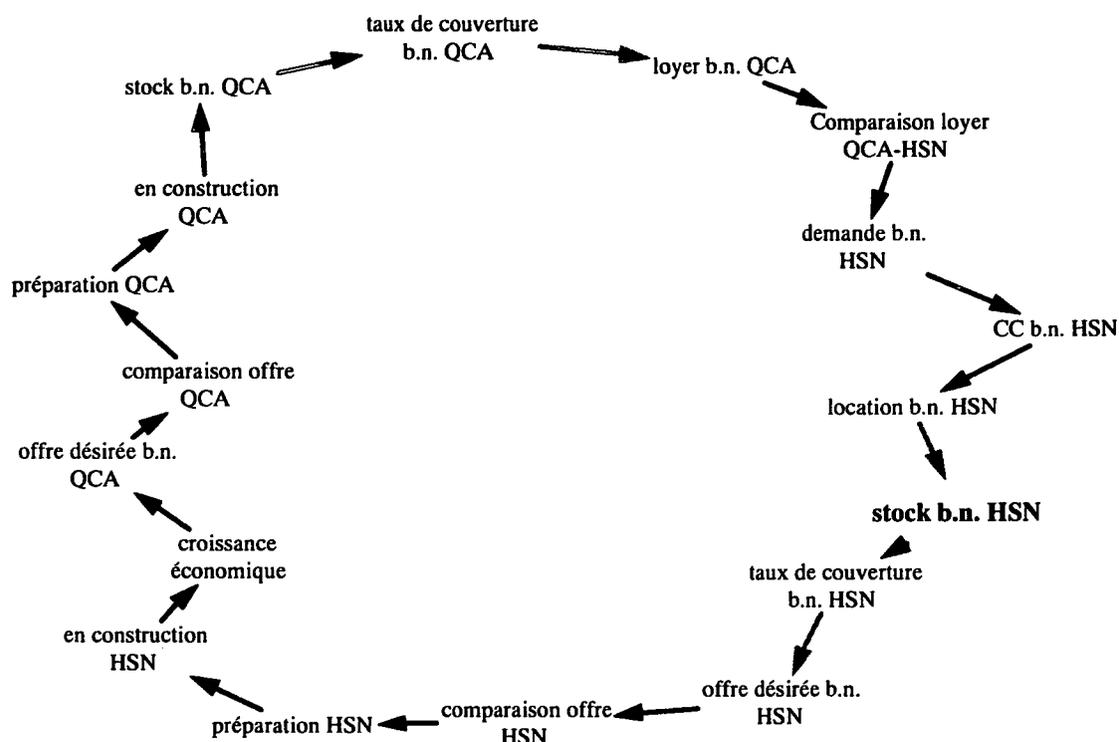
Le nombre de boucles dépend aussi très fortement de la prise en compte ou pas de relations d'influence entre les travaux BTP et la croissance économique. On passe ainsi d'un total d'environ 40 boucles pour l'ensemble des deux secteurs géographiques si on néglige cette influence, à plus de 400 boucles si au contraire on en tient compte.

Parmi les très nombreuses boucles révélées dans le modèle, quelques unes ont été retenues qui nous ont paru représentatives, tant sur un plan pédagogique, que par les questions qu'elles soulèvent.

V.1 - BOUCLE STABILISATRICE

Cet exemple prend en compte l'influence des travaux BTP sur l'économie. Il passe par le « Stock bureaux neufs (b.n) Hauts de Seine Nord » 229 boucles pouvant impliquer jusqu'à 22 variables causales.

Voici comment s'analyse une des boucles les plus longues de ce diagramme causal :



Si pour une raison quelconque, « Stock bureaux neufs . Hauts de Seine Nord » diminue, le « Taux de couverture bureaux neufs . Hauts de Seine Nord » va diminuer également.

L'« Offre désirée bureaux neufs . Hauts de Seine Nord », déterminée par ailleurs dans le modèle va augmenter. Dès lors, la « Comparaison offre Hauts de Seine Nord » entre l'offre désirée et l'offre effective va motiver la mise en route de nouveaux projets de construction dans le secteur Hauts de Seine Nord, qui font l'objet d'abord d'une « Préparation Hauts de Seine Nord » puis d'une mise « En construction Hauts de Seine Nord ».

Ces travaux favoriseront de façon positive et dans une certaine mesure la « Croissance économique ». Cette relance de l'activité économique globale rejaillira sur « Offre désirée bureaux neufs . Quartier Central d'Affaires » qui augmentera et appellera de nouveaux programmes de construction selon la même séquence : « Comparaison offre Quartier Central d'Affaires », « Préparation Quartier Central d'Affaires », « En construction Quartier Central d'Affaires ».

Le « Stock bureaux neufs . Quartier Central d'Affaires » va donc être augmenté de ces constructions nouvelles, ce qui aura pour conséquence d'augmenter le « *taux de couverture bureaux neufs . Quartier Central d'Affaires* ».

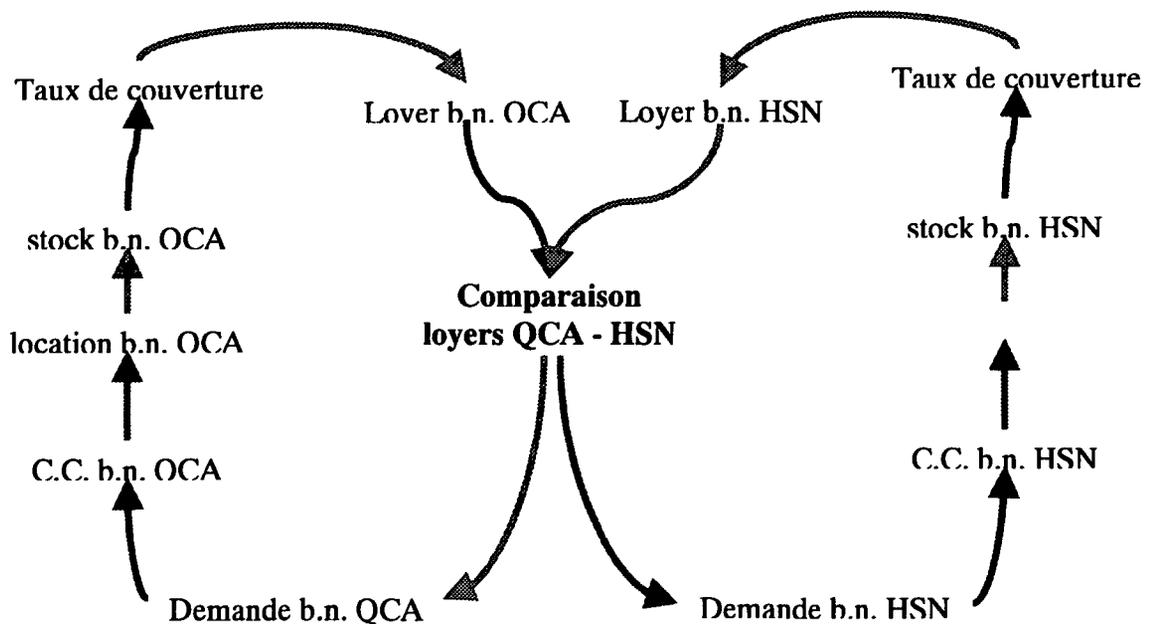
Si le « *taux de couverture bureaux neufs . Quartier Central d'Affaires* » augmente, le « *Loyer bureaux neufs . Quartier Central d'Affaires* » diminue (toutes choses égales par ailleurs), et par voie de conséquence, la différence entre les loyers les deux secteurs « *Comparaison Quartier Central d'Affaires . Hauts de Seine Nord* » rendra moins attractifs les loyers Hauts de Seine Nord. La demande des bureaux dans le secteur Hauts de Seine Nord (« *Demande bureaux neufs . Hauts de Seine Nord* ») tendra donc à baisser, contribuant à faire baisser le niveau du carnet de commande « *Carnet de Commande bureaux neufs . Hauts de Seine Nord* », donc des « *Location bureaux neufs . Hauts de Seine Nord* ». Ceci tend à remonter le niveau du « *Stock bureaux neufs . Hauts de Seine Nord* », compensant en partie la diminution de départ de cette même variable. Ce comportement est caractéristique d'une boucle stabilisatrice.

Cette boucle est dite stabilisatrice dans la mesure où elle exerce une « *force centripète* » sur toutes les variables de la boucle, constamment rééquilibrées par le jeu de l'offre et de la demande.

La longueur de la boucle met bien en évidence l'effet du temps sur le phénomène de régulation. Celui-ci n'intervient qu'après la réalisation des programmes de construction. Le lien de cause à effet entre la baisse initiale du Stock bureaux neufs. HSN et la compensation progressive de cette baisse en sens inverse n'est donc pas évident à lire, sans l'aide d'un modèle.

V.-2 - LA COMPARAISON DES LOYERS ET LE JEU DE LA CONCURRENCE

Les deux boucles ci-dessous permettent de comprendre comment la comparaison entre les loyers des deux secteurs joue sur le marché global. Si l'écart le loyer diminue, une préférence sera donnée au secteur Quartier Central d'Affaires.

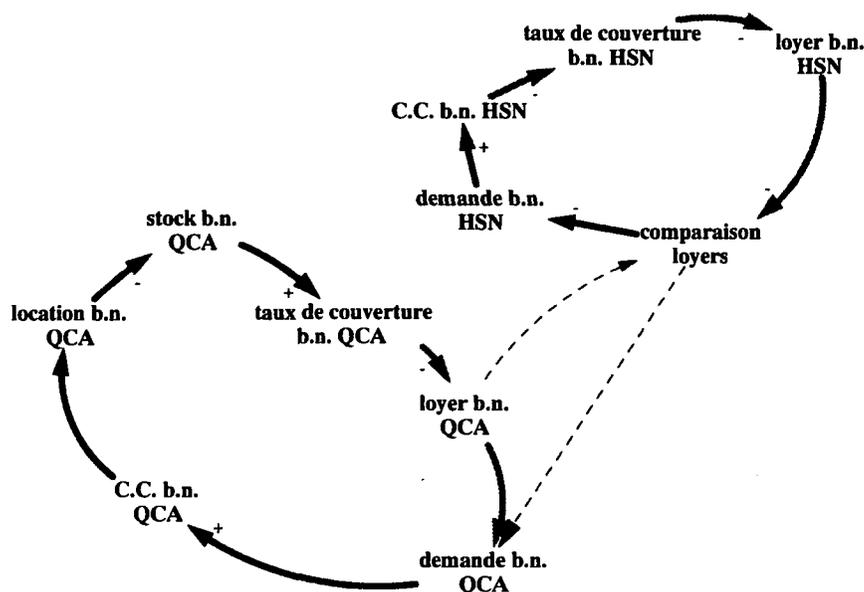


Mais la régulation décrite ci-dessus jouera son rôle et tendra à inverser cette tendance avec le temps.

V.-4 - LE TAUX DE COUVERTURE

Deux boucles passant par le «taux de couverture» ont été sélectionnées.

Ces boucles se retrouvent dans les deux secteurs Quartier Central d'Affaires et Hauts de Seine Nord. En fait, en représentant deux causalités supplémentaires (en pointillés) entre secteurs, nous avons ajouté deux nouvelles boucles facilement analysables.



VI - Quelques exemples d'analyses de sensibilité

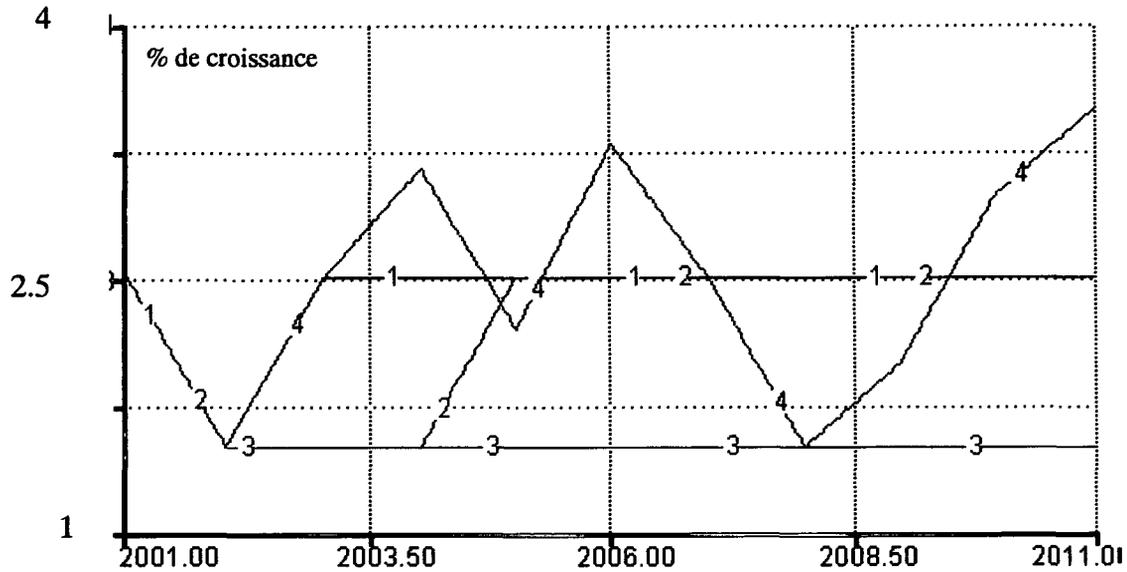
VI.1 - SCENARIOS DE CROISSANCE ECONOMIQUE

Dans ce cas, la variable d'entrée est représentée par une table correspondant au graphe temporel de la croissance. Il faut donc faire tourner les scénarios un par un, les courbes résultantes étant visualisées de manière comparative sur les graphes de la page Simulations Comparatives.

Quatre scénarios ont été retenus :

1. Scénario Référence : 2,5% de croissance en 2001, passant progressivement à 1,5% en 2002, puis revenant à et restant à 2,5% en 2003 et après.
2. Scénario de crise assez prolongée : la croissance faible à 1,5% se prolonge jusqu'au début 2004, la remontée jusqu'à 2,5% se faisant au cours de l'année 2004.
3. Scénario de crise profonde : la croissance à 1,5% se prolonge indéfiniment.
4. Scénario de croissance variable (« aléatoire ») : on fait varier la croissance de manière quasi-aléatoire.

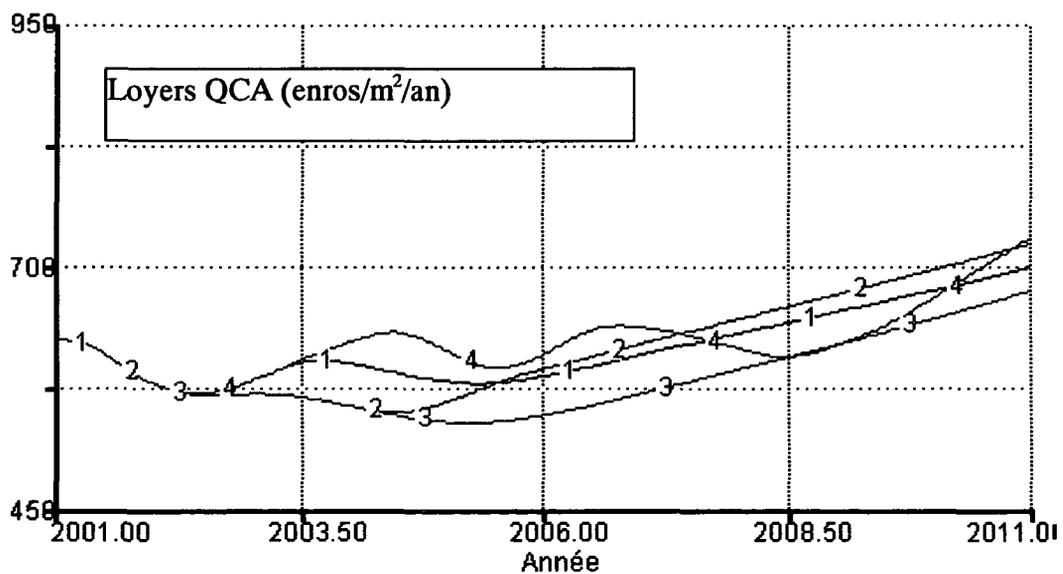
Les scénarios de croissance économique



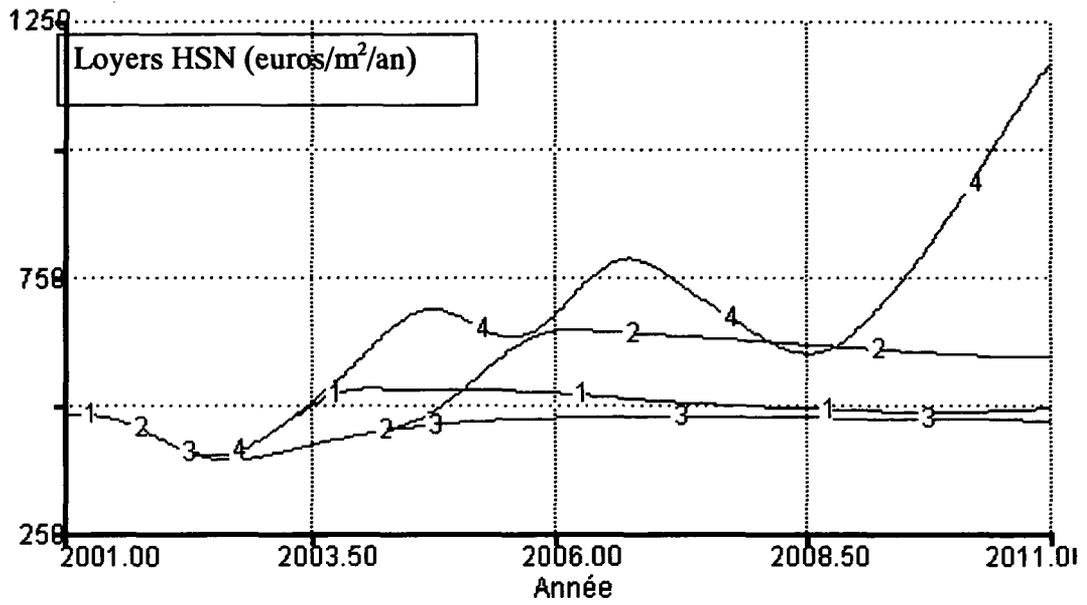
Les graphes qui suivent montrent l'évolution dans les quatre cas de certaines variables importantes du modèle. L'analyse de ces résultats ne peut être faite valablement qu'avec des experts du marché immobilier. A ce stade, on se limitera à deux constats :

- 1 – dans le cas du scénario de crise profonde, les résultats concernant la demande, les bureaux construits et les prix, sont logiques.
- 2 – une crise assez prolongée (3 ans) se ressent pendant le temps de la crise, mais la reprise en ce qui concerne la demande et les prix est plus sensible qu'en cas de crise courte (scénario de base).

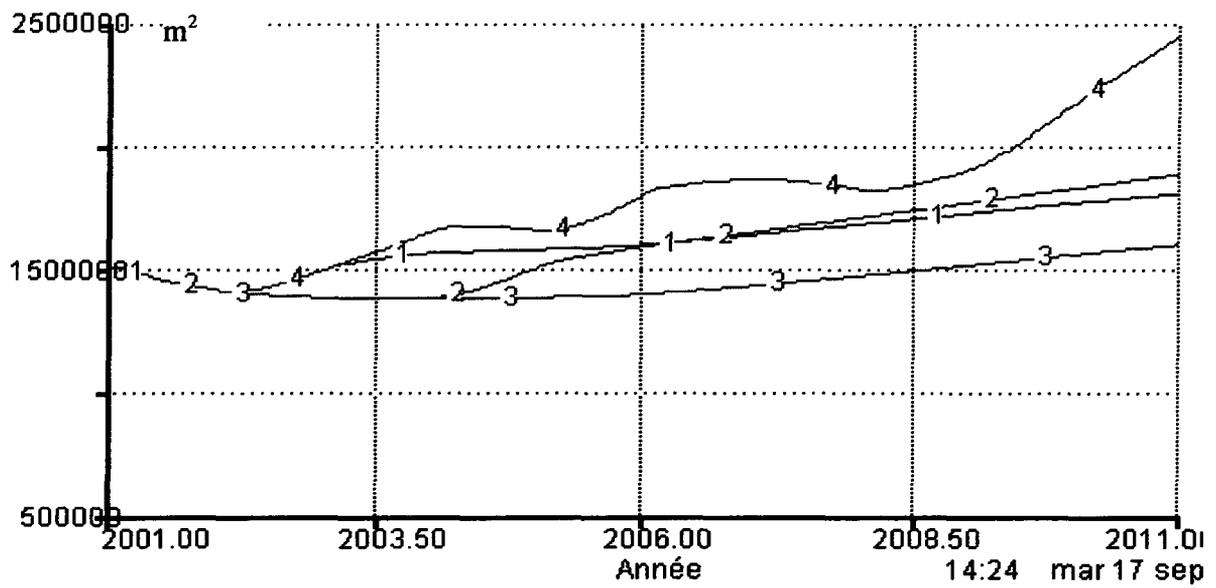
A - Loyers Quartier Central d'Affaires



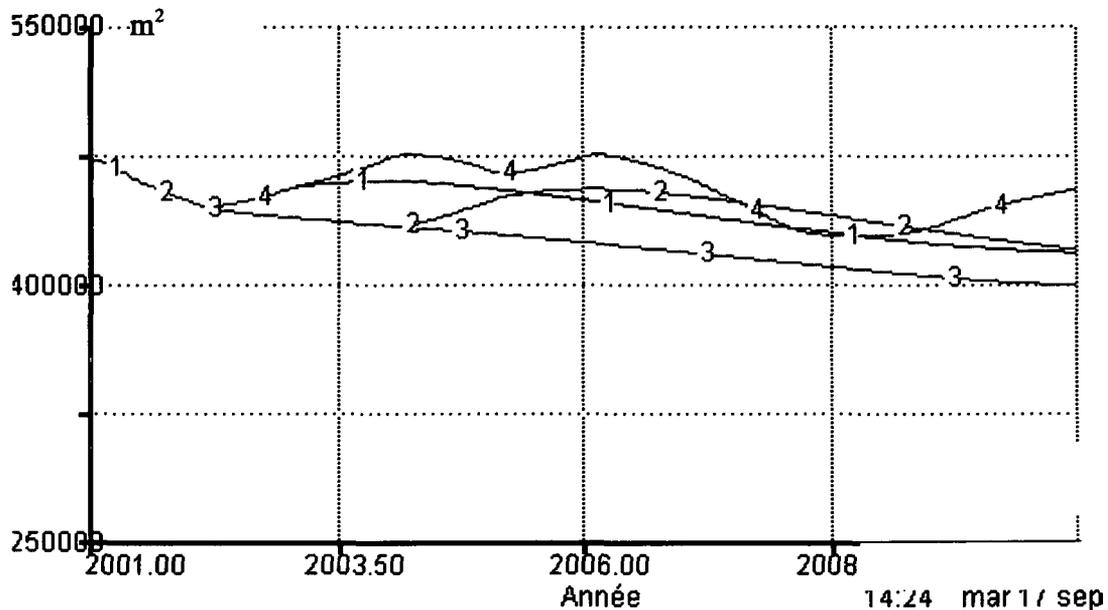
3 - Loyers Hauts de Seine Nord



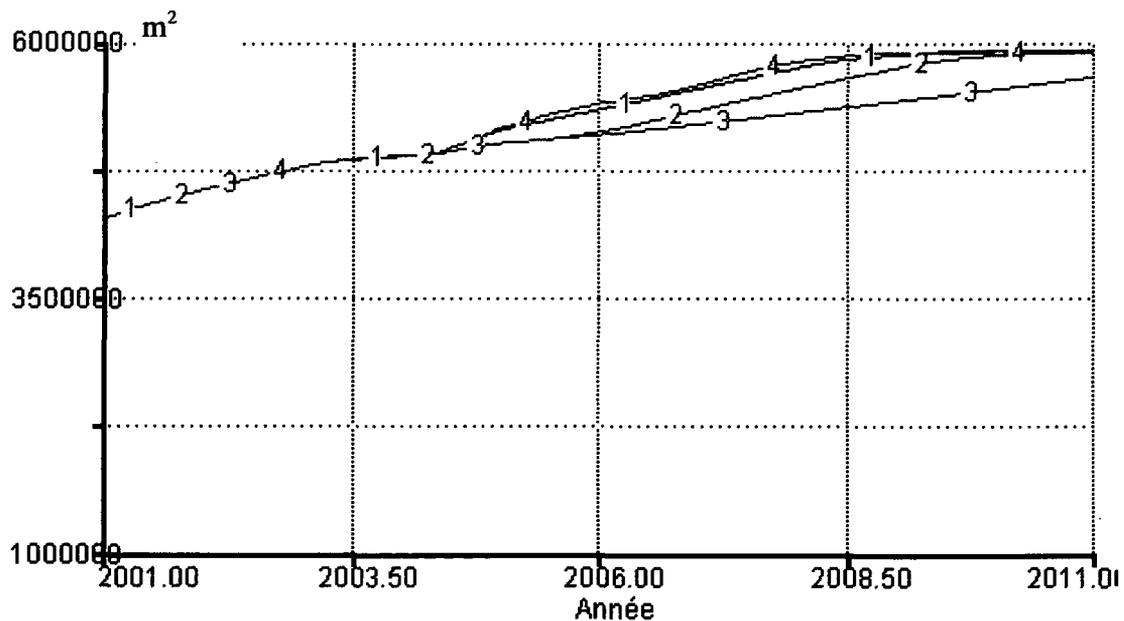
C - Demande Bureaux Quartier Central d'Affaires



D - Demande Bureaux Hauts de Seine Nord



E - Total Bureaux Disponible Hauts de Seine Nord

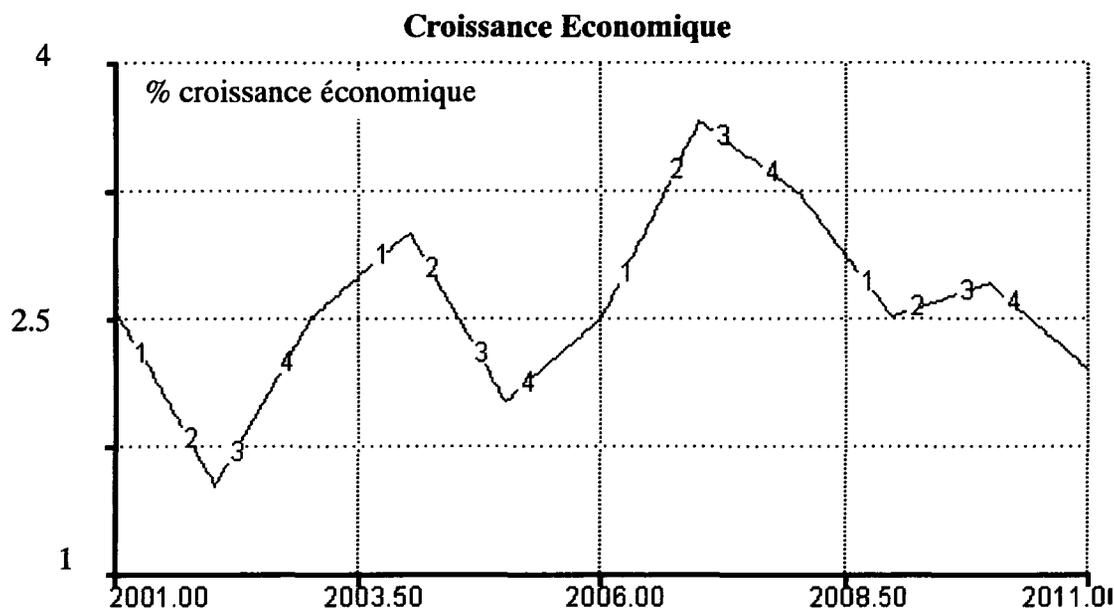


NB : Chaque courbe reprend un des quatre scénarios de croissance économique décrits ci-dessus.

- 1 : Scénario référence**
- 2 : Scénario de crise assez prolongée**
- 3 : Scénario de crise profonde**
- 4 : Scénario de croissance variable**

VI.-2 - SCENARIOS D'AUTORISATION DE CONSTRUCTION DE BUREAUX SUPPLEMENTAIRES

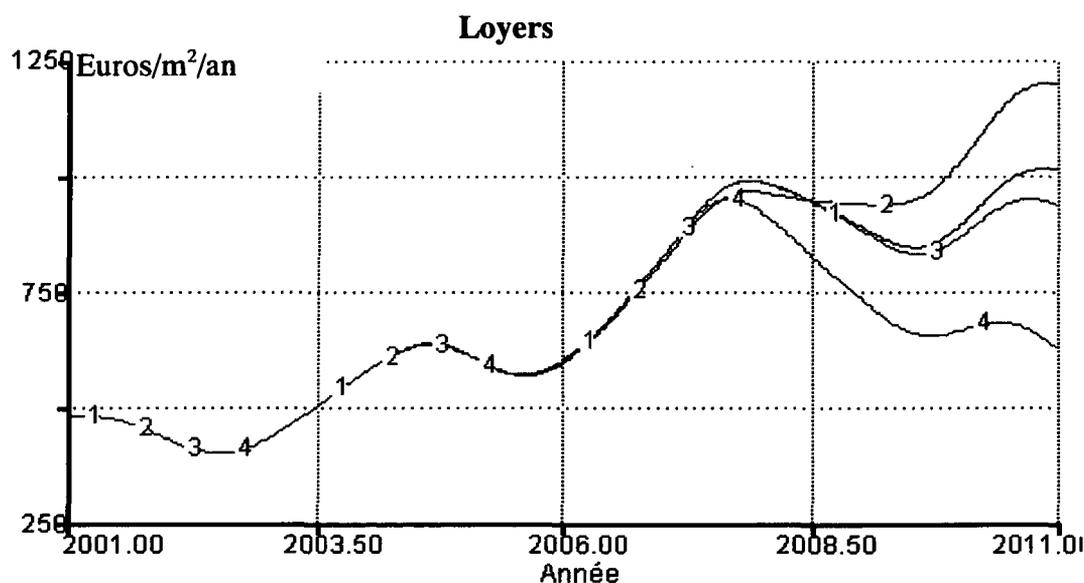
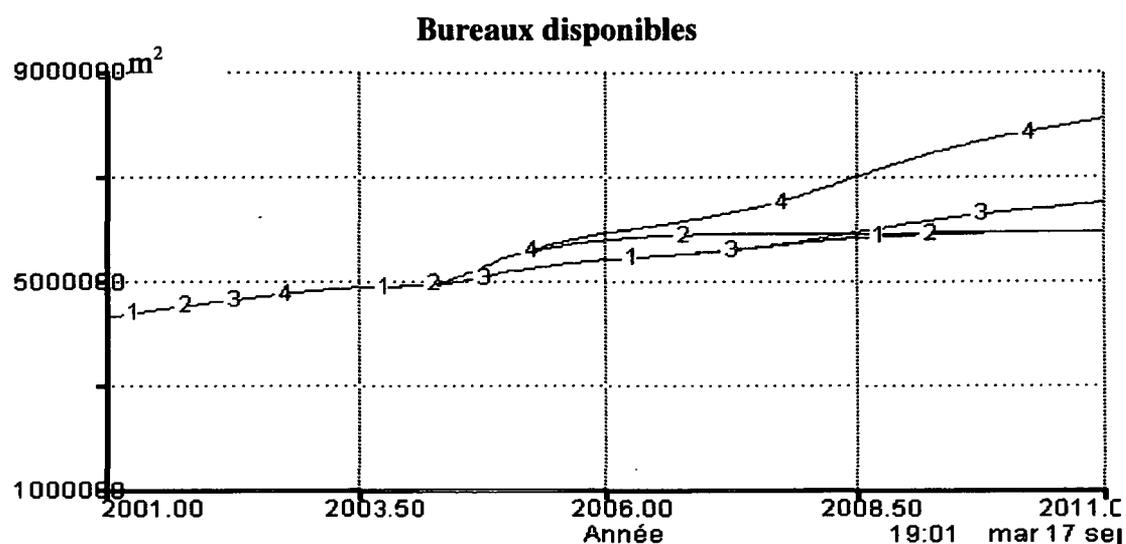
Nous avons comparé quatre scénarios mettant en scène plus ou moins d'autorisation de lancement de nouveaux bureaux Hauts de Seine Nord et/ou plus ou moins grande surface maximum de bureaux dans le même secteur. La croissance économique est variable (aléatoirement) et est la même pour les quatre scénarios.



- 1 - Scénario de base, avec une croissance économique variable au cours des 10 prochaines années.
- 2 - Doublement des autorisations (à partir de 2003) de lancement de nouveaux bureaux dans le secteur Hauts de Seine Nord.
- 3 - Doublement de la surface maximum autorisée de bureaux (secteur Hauts de Seine Nord), sans augmentation du lancement de nouveaux bureaux.
- 4 - Combinaison des scénarios 2 et 3.

Les résultats (cf. courbes ci-après) sont conformes à l'intuition logique. Seul résultat un peu surprenant a priori (mais vite expliqué) : le scénario 2, correspondant à un doublement des autorisations de lancement, est celui qui mène à la plus forte augmentation des loyers. Ceci nous semble dû au fait qu'on arrive plus vite à la saturation en nombre total de bureaux disponibles, le maximum autorisé n'ayant pas été révisé à la hausse.

Inversement, le scénario 4 mène à la plus forte baisse des prix, le nombre de bureaux disponibles étant en nette augmentation.



NB : Chaque courbe reprend un des quatre scénarios de croissance économique décrits ci-dessus.

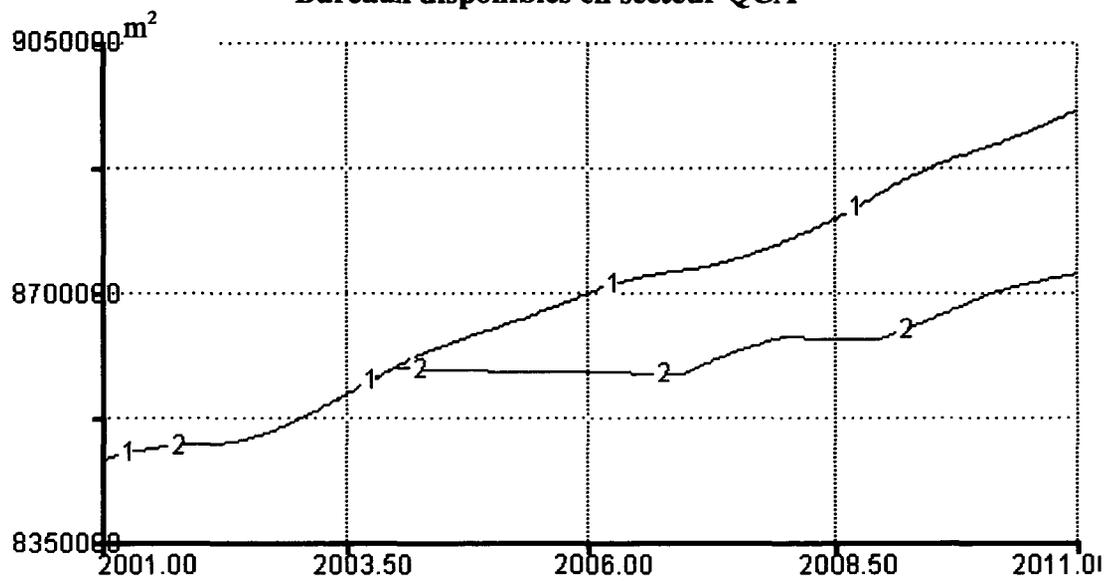
- 1 : Scénario référence**
- 2 : Scénario de crise assez prolongée**
- 3 : Scénario de crise profonde**
- 4 : Scénario de croissance variable**

VI.3 - SCENARIO D'ACCROISSEMENT DES TEMPS DE CONSTRUCTION

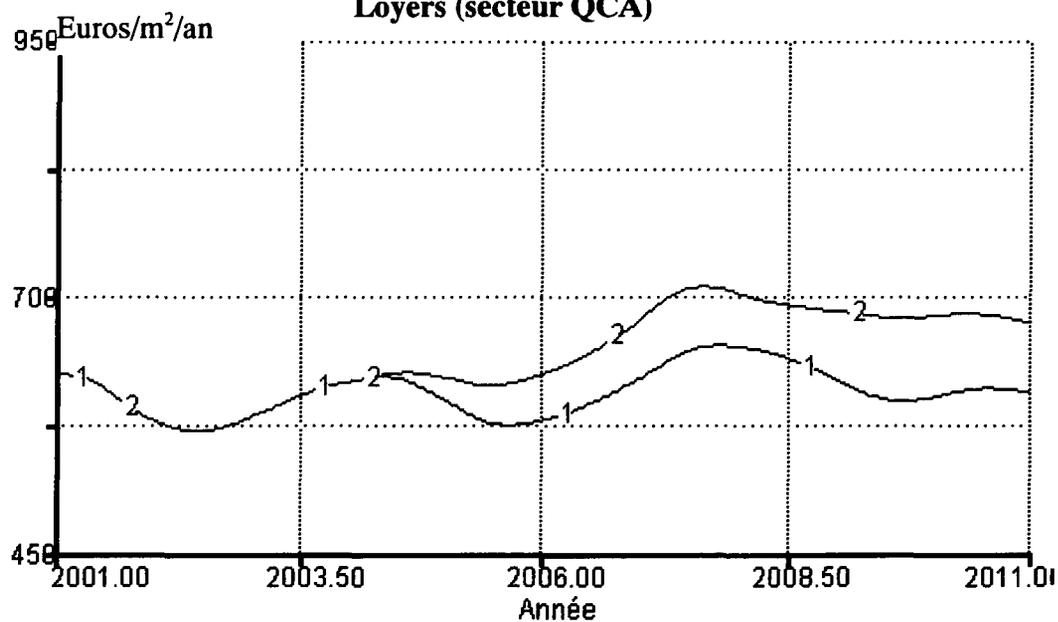
Nous avons simulé l'effet d'une forte augmentation des temps de préparation (2 ans au lieu d'une année dans le scénario de base) et de construction (4 ans au lieu d'un) dans le secteur Quartier Central d'Affaires.

Le résultat est logique : baisse du nombre de bureaux construits, hausse des loyers correspondants.

Bureaux disponibles en secteur QCA



Loyers (secteur QCA)



NB : Chaque courbe reprend un des quatre scénarios de croissance économique décrits ci-dessus.

1 : Scénario référence

2 : Scénario de crise assez prolongée

3 : Scénario de crise profonde

4 : Scénario de croissance variable

Annexe 1 : Présentation et mode d'emploi des éléments d'interface du modèle

Le Tableau de bord

Présentation du tableau de bord

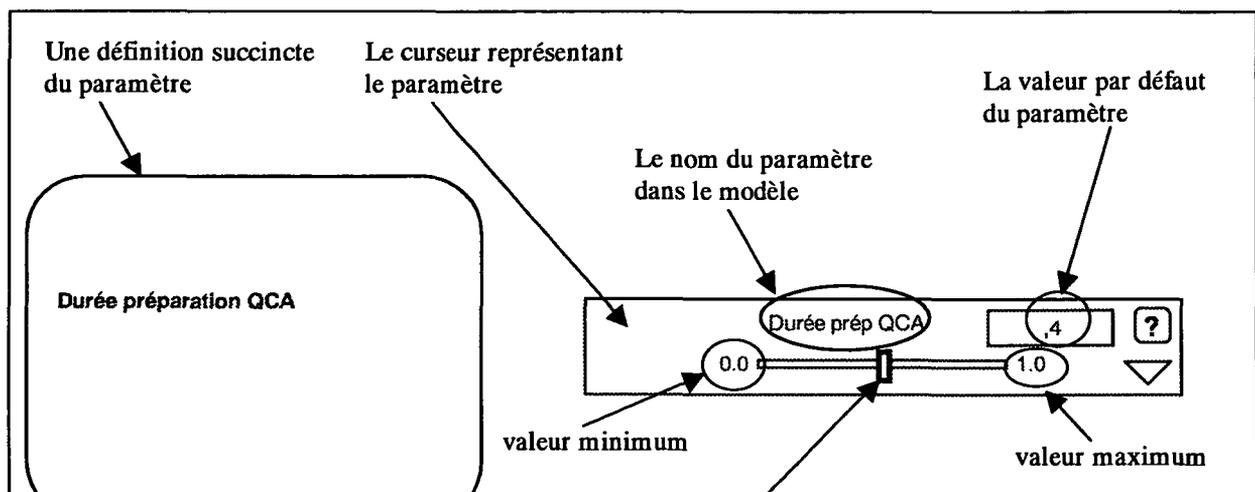
Le tableau de bord - interface d'utilisation du modèle SIMIMMO - se présente sous la forme de plusieurs écrans librement accessibles à partir du modèle ou de n'importe quel point du tableau de bord lui-même. Chacun d'eux comporte une série de curseurs, de boutons et de fonctions graphiques, qui représentent les paramètres sur lesquels l'utilisateur peut intervenir. Les paramètres ainsi modifiables sont regroupés par type et par écran:

La programmation des paramètres

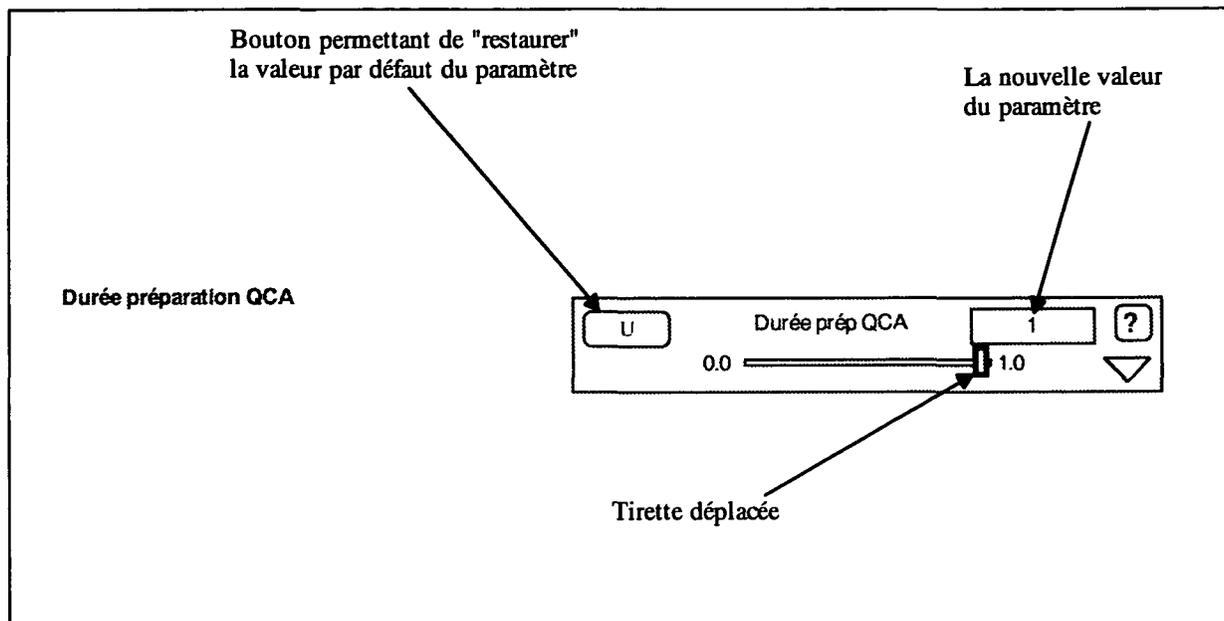
Les paramètres sur lesquels l'utilisateur du modèle peut agir sont de quatre types: les curseurs, les boutons (switchs), les tableaux et les fonctions graphiques. Ils ont chacun une représentation et une programmation particulières qui sont expliquées dans les deux paragraphes qui suivent.

Les curseurs

Les curseurs sont la représentation au niveau de l'interface des constantes du modèle. Ces constantes ont une valeur par défaut et l'utilisateur peut décider pour simuler un autre type d'évolution de modifier leur valeur. Les figures qui suivent, montrent les différentes parties des curseurs avant et après la programmation par l'utilisateur.

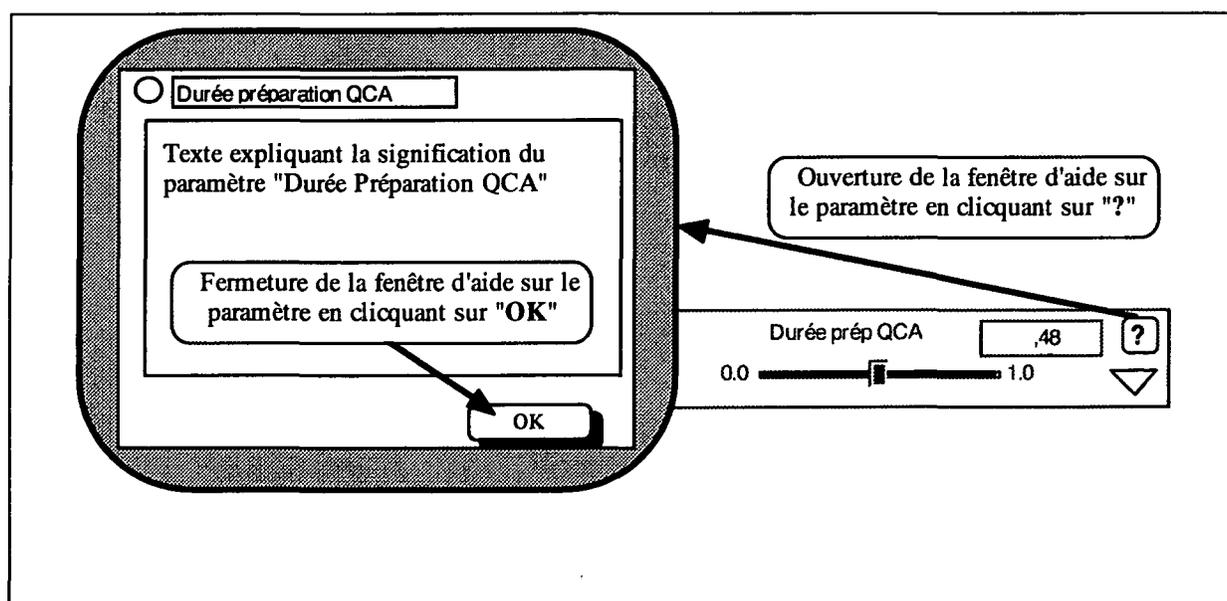


Description d'un curseur avant la programmation



Description d'un curseur après la programmation

Une fenêtre d'aide est également disponible sur certains paramètres. Elle explique la définition et l'utilisation de ce paramètre dans le modèle et dans certains cas, les significations des valeurs extrêmes. Le schéma suivant montre cette fenêtre et comment l'utiliser



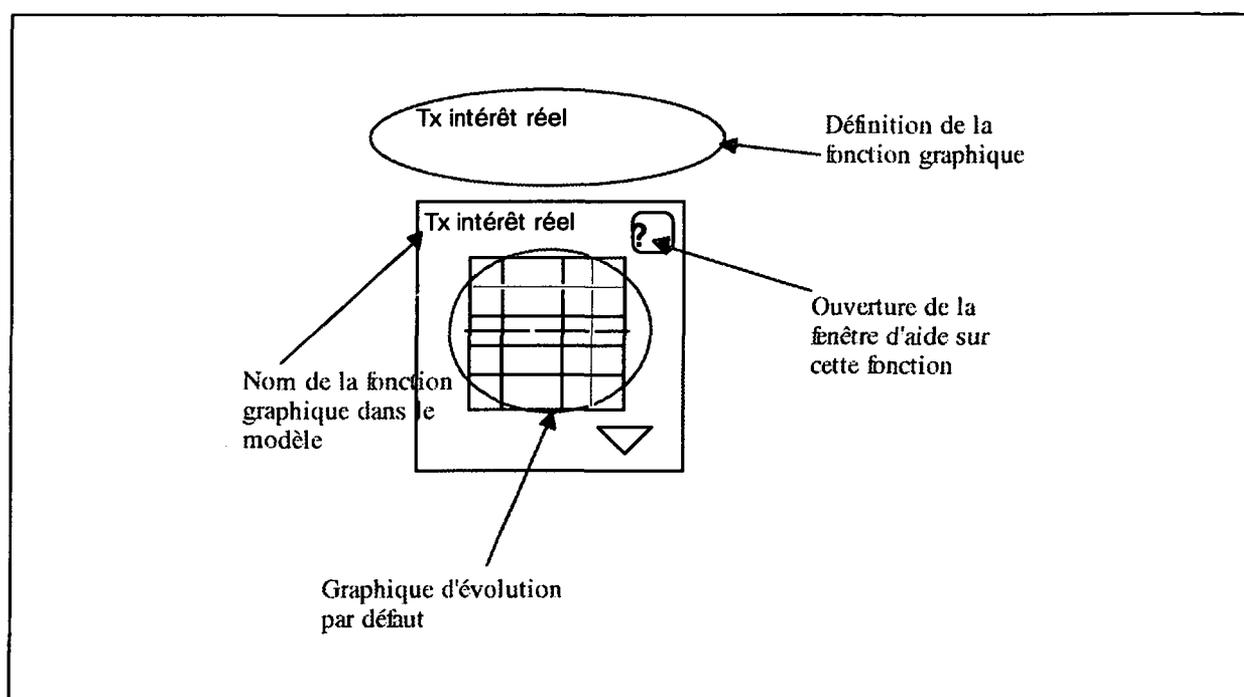
Description d'un curseur après la programmation

Les fonctions graphiques

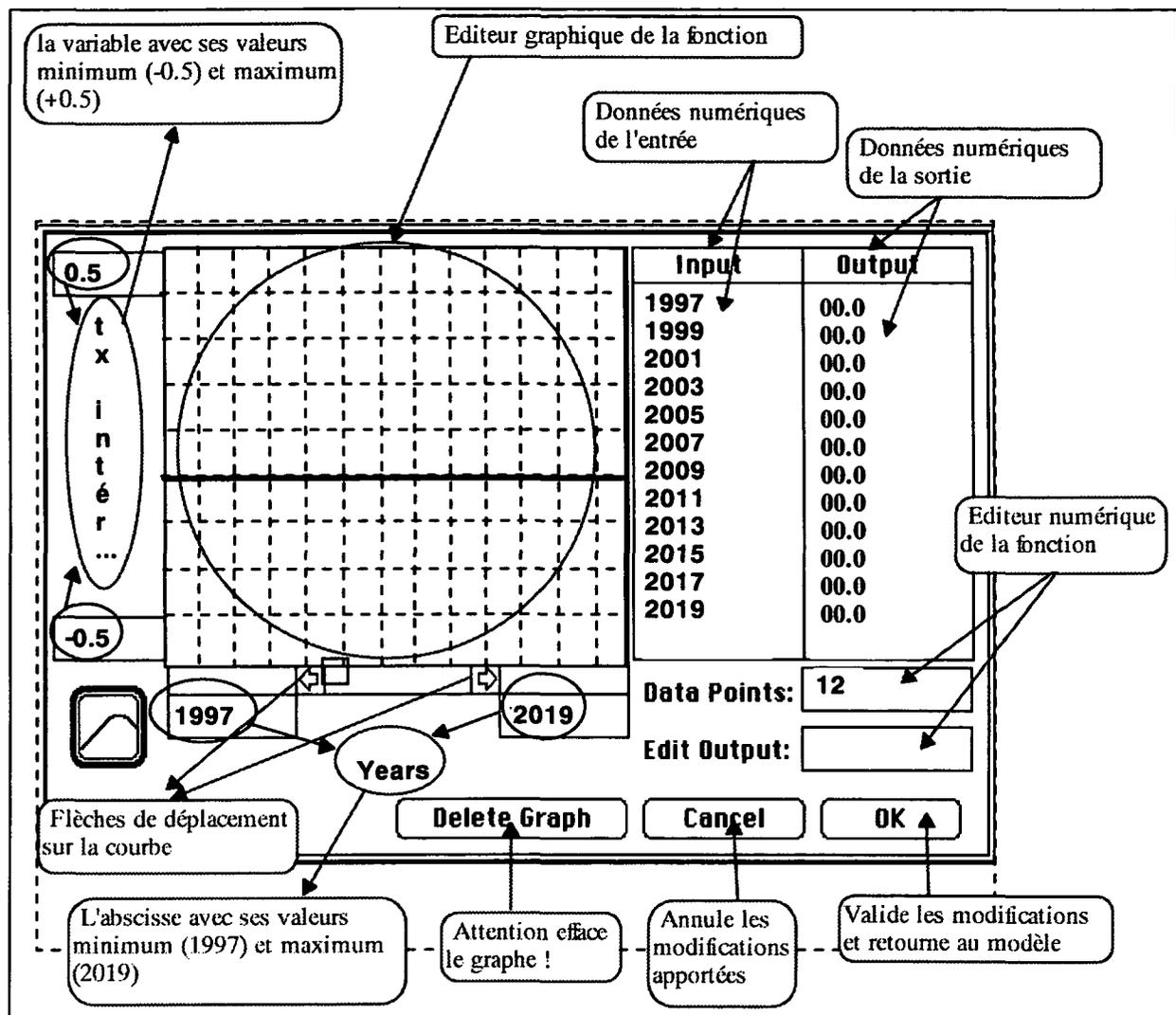
Les fonctions graphiques représentent des variables dont l'évolution est contrôlée par le modélisateur. Celles apparaissant sur l'interface représentent donc des variables dont la tendance sera programmée par l'utilisateur afin d'analyser des scénarios particuliers.

La fonction graphique permet donc de définir comment une variable donnée va évoluer au cours de la simulation. Sa programmation nécessite une réflexion préalable, puisqu'il est nécessaire, dans ce cas de paramétrage, de définir autant de point qu'il y a d'abscisses dans le graphe.

Les figures ci-après montrent comment la fonction peut être programmée, et donnent un exemple de paramétrage.



Description de la fonction graphique. Pour modifier une fonction graphique, il suffit de double-cliquer dessus, et un éditeur de graphe s'ouvre alors permettant de modifier les valeurs.

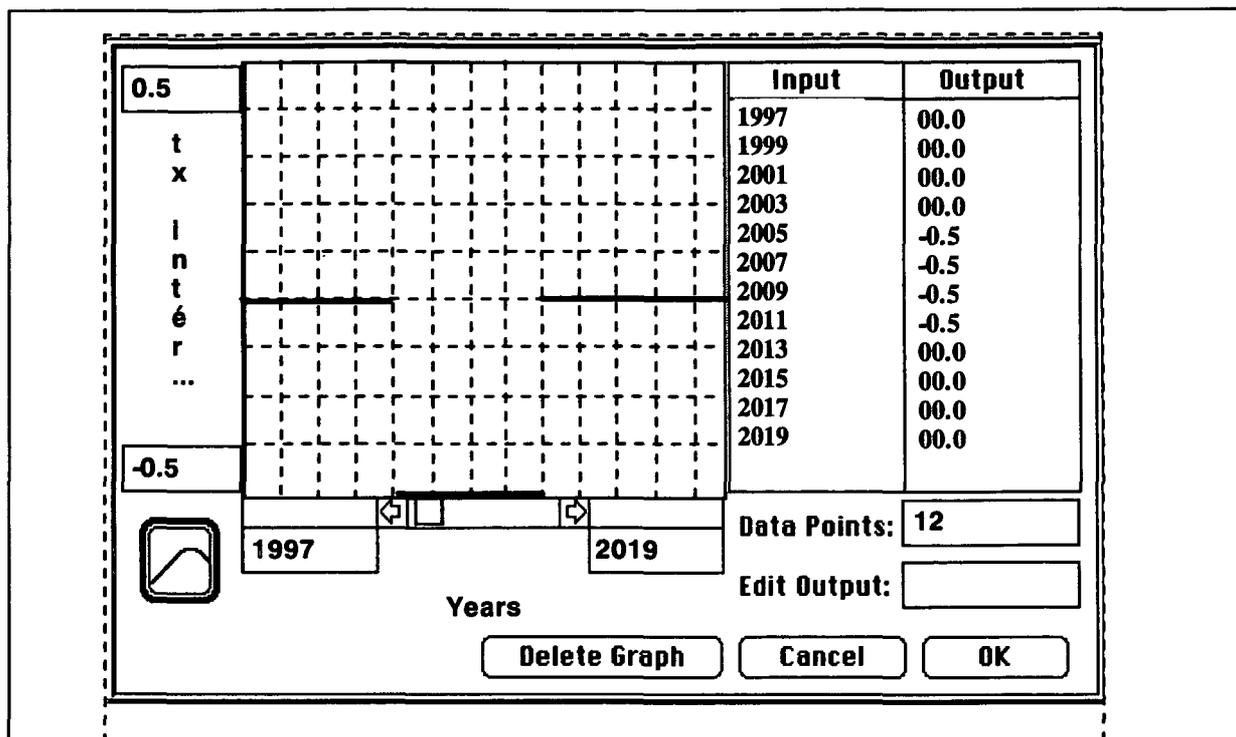


Description de l'éditeur graphique

Pour modifier les valeurs, deux possibilités sont offertes:

La modification graphique: l'utilisateur modifie directement avec la souris, la courbe de la fonction.

La modification numérique: l'utilisateur rentre, valeur par valeur, les données qu'il veut modifier, dans la case "edit ouput", en les validant par la touche "tab"



Description de l'éditeur graphique

Dans l'exemple ci-dessus, l'utilisateur a modifié la valeur d'évolution exogène des prix pour les années 2005 à 2013. La nouvelle valeur étant de -0.5, le taux d'intérêt diminuera de 50% par an pendant ces années alors qu'une modification de +0.5, l'aurait fait croître.

Les boutons (switchs)

Ces boutons, dont chaque fonction est décrite à côté du bouton lui-même, permettent de simuler des scénarios « simplifiés », c'est-à-dire en tout ou rien.

Les tableaux

Il s'agit là de tableaux de valeurs initiales ou de paramètres du modèle ne pouvant pas varier en cours de simulation. Ils ne peuvent donc être modifiés qu'au début de toute nouvelle simulation.

La simulation

Les écrans de l'interface qui suivent le tableau de bord, contiennent les graphes de simulation sur lesquels vont apparaître les courbes d'évolution des variables. Un graphe peut-être composé de une ou plusieurs pages, chacune d'elles contenant au maximum cinq variables du modèle. Pour que le scénario soit simulé, plusieurs opérations doivent être réalisées auparavant:

- 1) la configuration des paramètres (cf. paragraphe précédent),
- 2) la configuration de la durée de la simulation,
- 3) le lancement de la simulation.

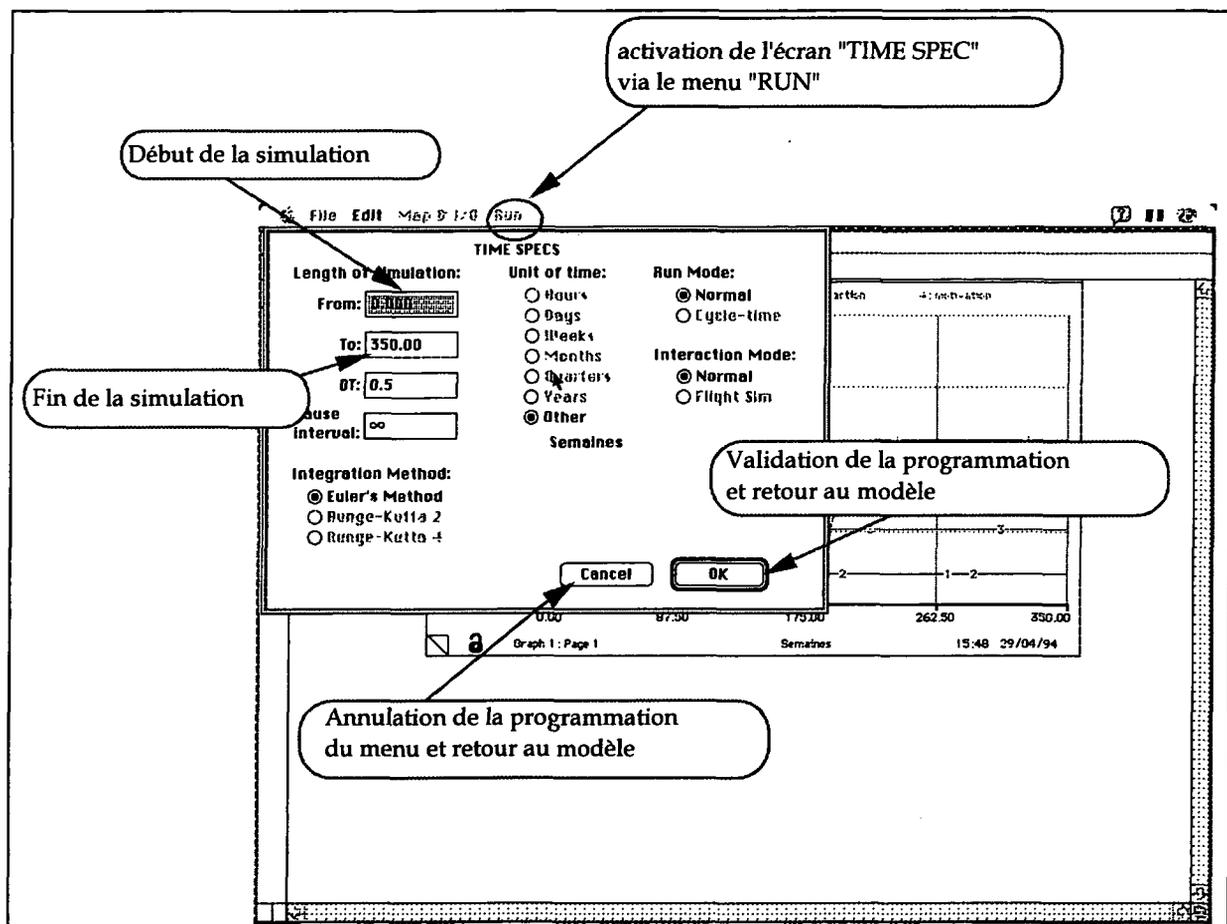
Les étapes 2 et 3 sont expliquées dans les pages suivantes.

La configuration de la durée de la simulation

La durée de simulation d'un scénario dépend de la dernière année sur laquelle l'utilisateur veut avoir des informations.

Le temps est donc une notion importante et un écran de configuration des paramètres temporels de la simulation a été prévu à cet effet. Cet écran est activé par la fonction "Time Spec" du menu "RUN" de la barre d'outil (barre située en haut de l'écran).

L'écran de configuration de la simulation est expliqué dans la figure ci-dessous. Les paramètres de l'écran de configuration, ne comportant pas de texte explicatif, ne doivent pas être modifiés: ils correspondent aux méthodes de calcul utilisées pendant la simulation (échantillonnage, méthode d'intégration...).



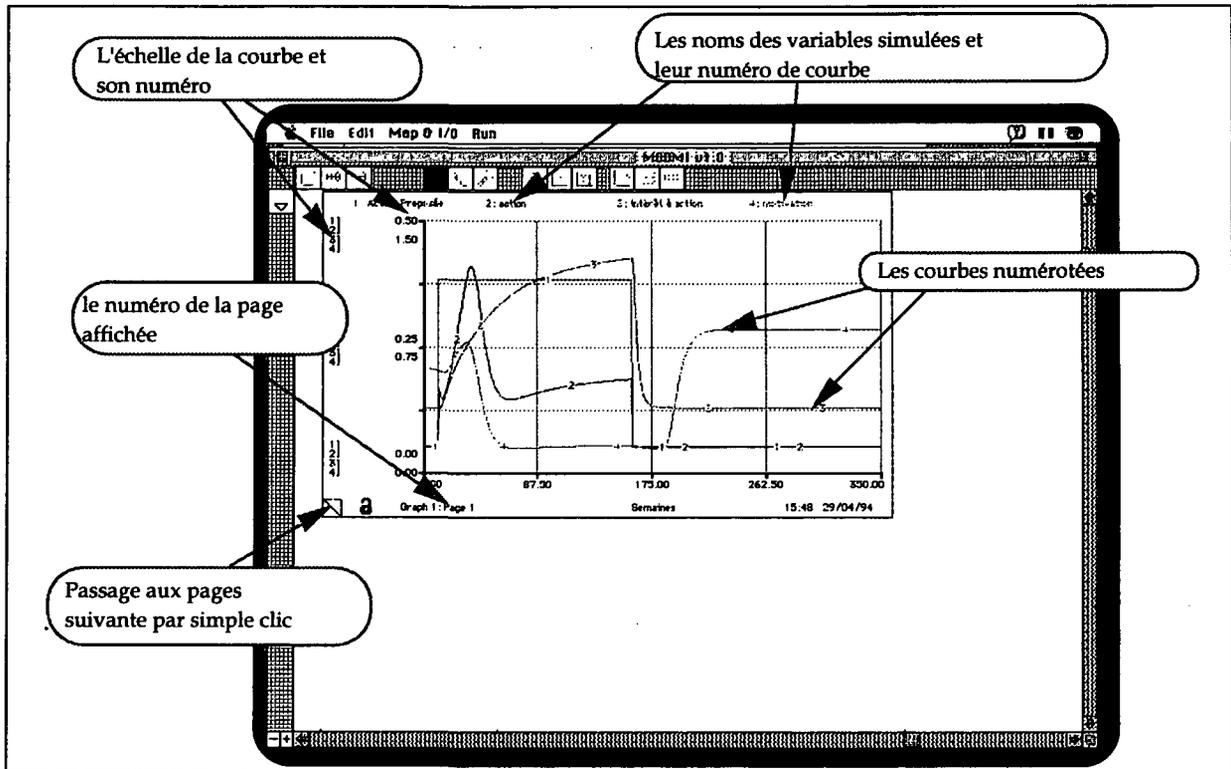
Activation de la fenêtre de paramétrage temporel de la simulation

Lancement de la simulation

Une fois les paramètres temporels programmés, la simulation peut être lancée. Au niveau de l'interface réalisée pour ce modèle, les opérations de démarrage, pause, arrêt, etc. sont évidentes et ne nécessitent guère d'explication. On peut aussi vouloir faire des simulations tout en restant au niveau « modèle ». Pour cela, cliquer sur le menu "RUN" et tout en gardant le bouton de la souris enfoncé, déplacer le curseur jusqu'à ce que la fonction "RUN" soit sélectionnée, le bouton peut alors être relâché. La simulation démarre dès que le menu est

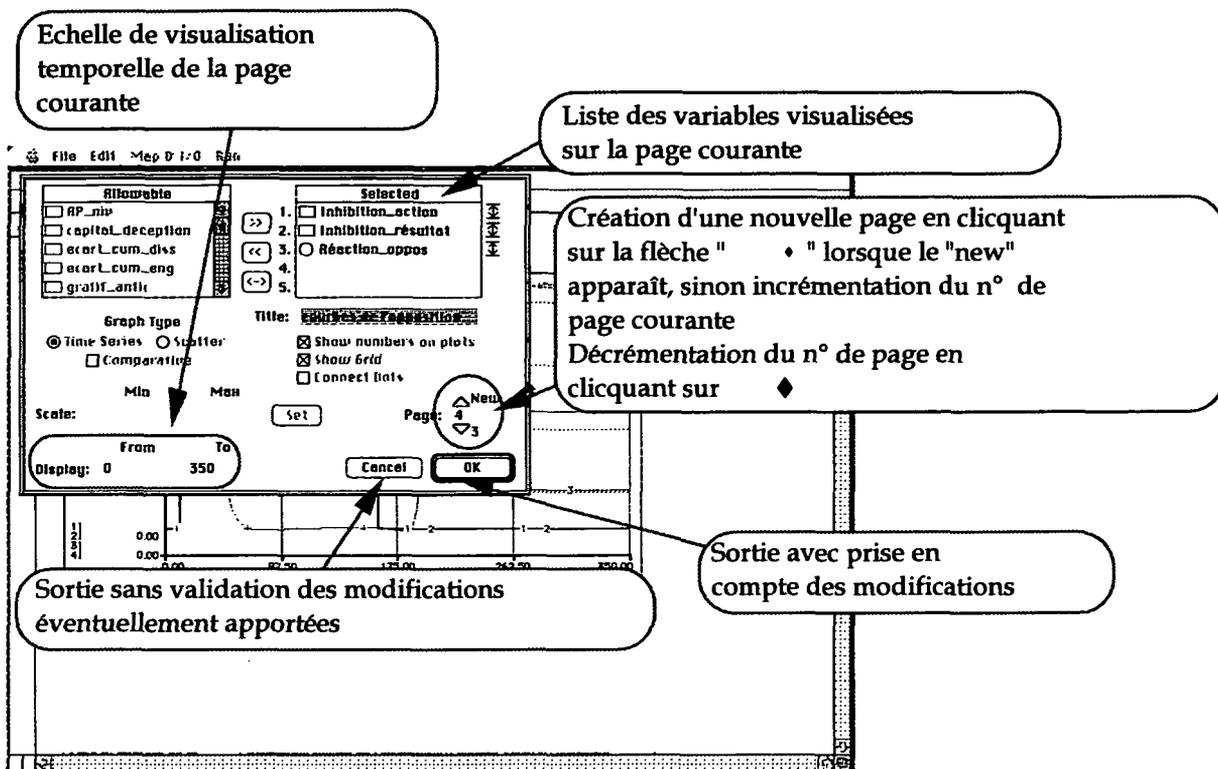
fermé et vous pouvez voir les différentes courbes du graphe de simulation se dessiner pendant que le compteur de temps indique le nombre d'unités écoulées. A tout instant la simulation peut être arrêtée: il suffit pour cela de re cliquer sur le menu "RUN" et tout en gardant le bouton de la souris enfoncé, déplacer le curseur jusqu'à ce que la fonction "STOP" soit sélectionnée.

La figure ci-dessous montre les différentes informations apparaissant dans une page de simulation et dans le graphe.



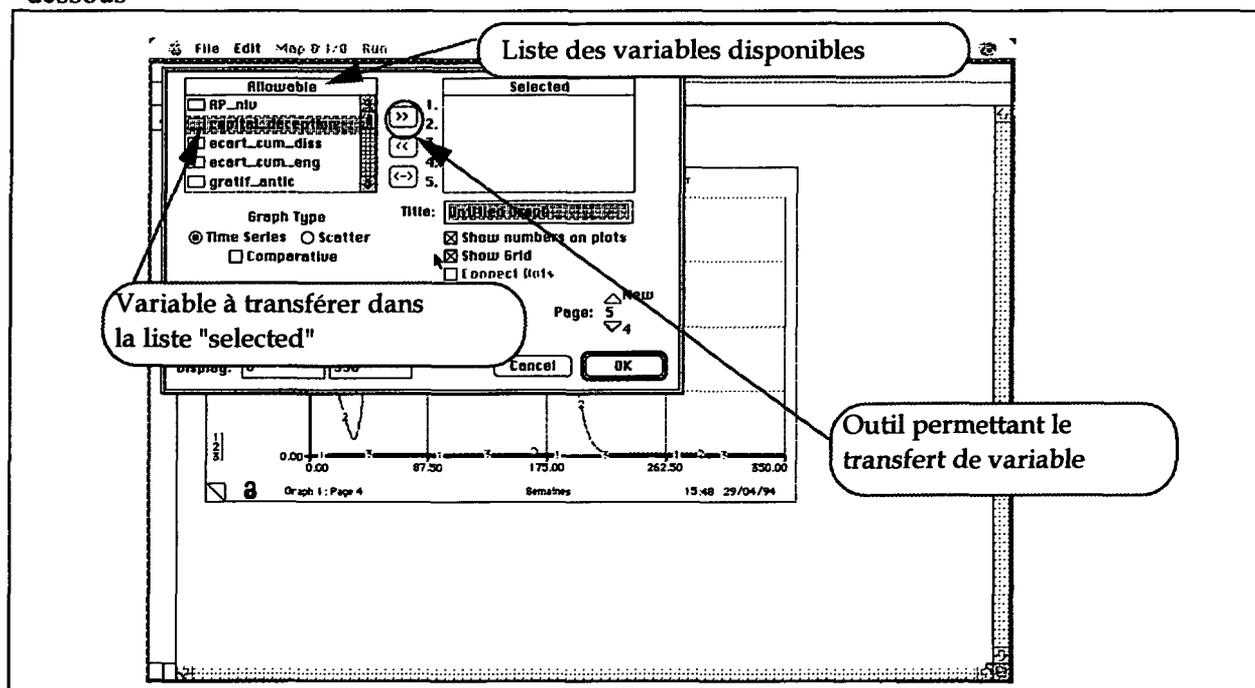
Le graphe de simulation

Le graphe peut être modifié par les utilisateurs de plusieurs manières: changement de l'échelle des courbes visualisées, ajout de nouvelles pages dans le graphe. Ces fonctions sont accessibles en cliquant rapidement deux fois à l'intérieur d'une page du graphe, ce qui ouvre une fenêtre dont les explications sont données dans les figures suivantes.



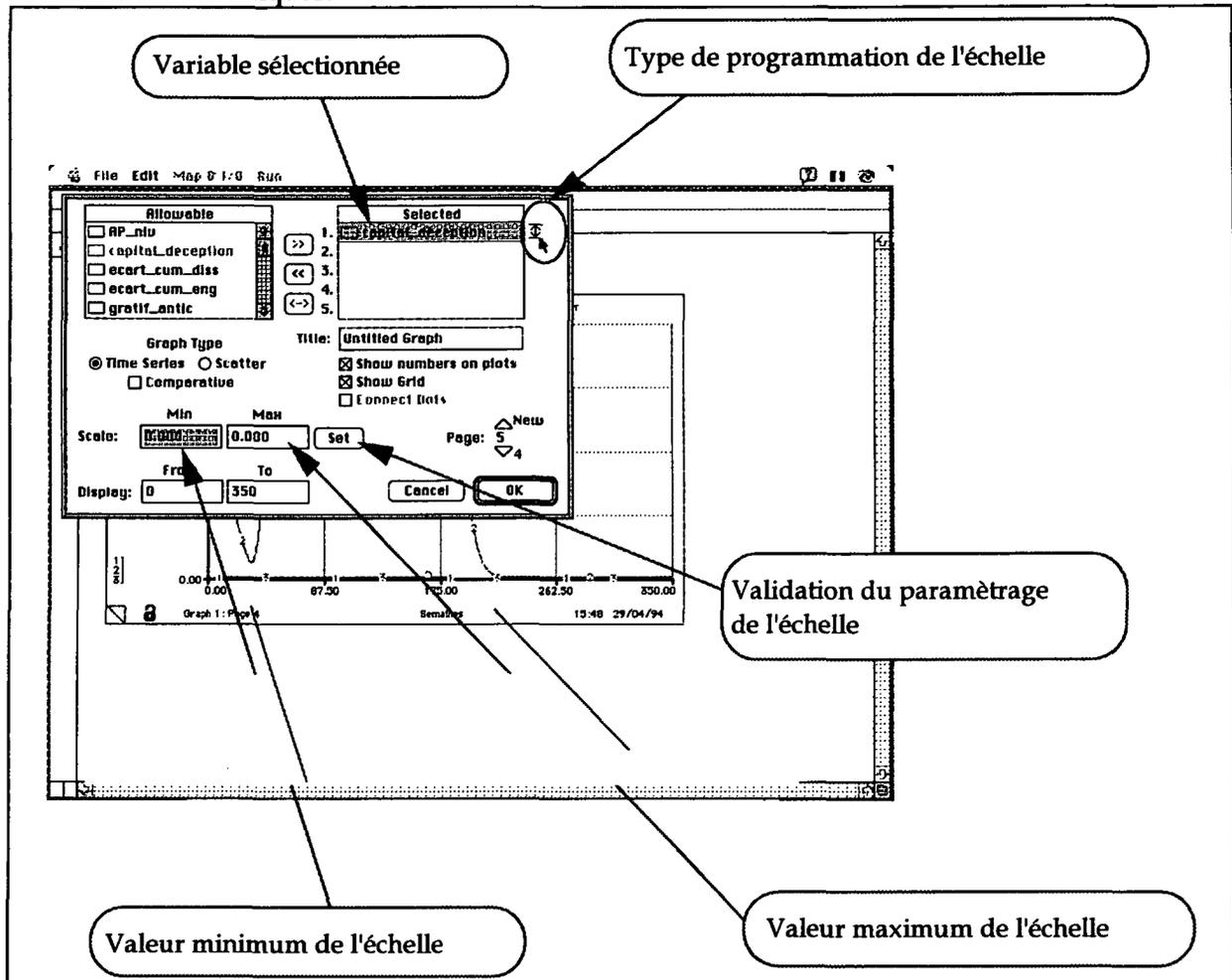
Fenêtre de paramétrage d'une page du graphe

Lorsqu'une nouvelle page est ajoutée au graphe (appui sur ^ lorsque "new" est affiché), celle ci apparaît sans aucune variable sélectionnée. La première opération est donc de déterminer qu'elles sont les variables qui apparaîtront sur cette nouvelle page, puis de les transférer dans la liste des variables visualisées. Cette opération est plus amplement décrite dans la figure ci-dessous



Sélection des variables d'un graphe

Une fois le transfert de la variable effectué, son échelle de visualisation peut être paramétrée. Cette opération n'est pas nécessaire pour le déroulement de la simulation, en effet si aucune échelle n'est spécifiée, le programme la choisira lui-même de façon à ce que la visualisation soit la plus grande possible. Cependant, si plusieurs variables sont sélectionnées sur la même page, et ont sensiblement la même échelle, il est plus facile de les comparer lorsque leurs échelles sont identiques.



Paramétrage des échelles des variables

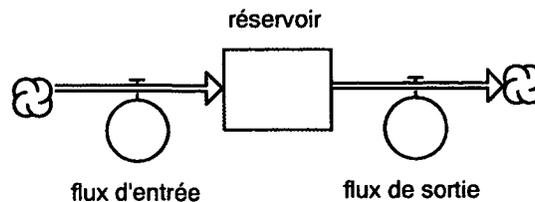
Le type de programmation de l'échelle comporte plusieurs options. A chaque "clic" sur cet outil, le type change et cela de façon circulaire. Les options disponibles sont:

- échelle libre , le programme visualise la variable avec une échelle allant de sa valeur minimum à sa valeur maximum, pendant la simulation .
- échelle forcée par l'utilisateur pour la visualisation dans la page courante
- échelle forcée par l'utilisateur pour l'ensemble des pages du graphe.

Le logiciel utilisé: STELLA

La première étape de la modélisation, consiste à représenter sous forme symbolique, propre au logiciel utilisé, l'ensemble des variables et des relations intervenant dans le processus étudié. Le logiciel choisi, STELLA, utilise les symboles des "diagrammes de Forrester". Afin de simplifier la lecture du modèle, les principaux symboles sont définis ci-dessous.

Le "Réservoir" et ses flux



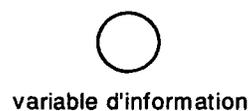
Le Réservoir est une variable de type "accumulateur": elle représente une grandeur qui intègre les résultats des actions prises dans le passé.

Ce type de variable, de par sa définition, change relativement lentement en réponse aux variations des autres variables du système.

La variation d'un niveau se fait par l'intermédiaire des variables de flux qui lui sont généralement associées : Flux d'entrée, Flux de sortie. On peut comparer ce type de variable à une baignoire se remplissant par le robinet et se vidant par le siphon.

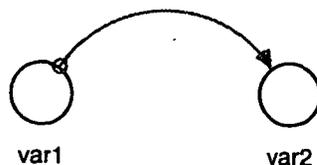
Le réservoir permet la représentation des variables dites variables d'état. Les niveaux des variables d'état d'un système à un instant T déterminent l'état du système à cet instant.

La variable d'information (de contrôle ou de décision)



Elle se modifie instantanément en fonction de son ou ses entrées.

Les flèches de relation



Elles représentent les liaisons entre les variables de niveau ou de contrôle. Le schéma précédent se lit: $\text{Var } 2=f(\text{Var } 1)$, la fonction $f()$ devant être définie mathématiquement, logiquement ou graphiquement.

Les constantes

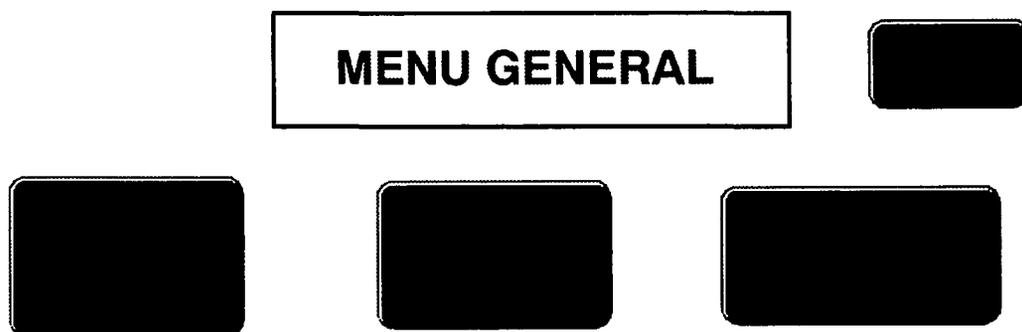
Elles n'ont pas de représentation propre. Elles pourront soit, être intégrées dans la définition de la fonction liant deux variables entre elles, soit, être représentées comme des variables de contrôle sans entrée. Ce graphisme permet alors de changer leur valeur pendant les tests de mise au point ou pendant les scénarios d'exploitation et est utilisé comme convention pour les variables exogènes .

Annexe 2 : Paramètres d'entrée – variables de sortie

1. - Paramètres d'Entrée

Dans la page du Menu Général, les paramètres d'entrée sont classés en trois groupes :

- les variables et paramètres d'entrée spécifiques du secteur Quartier Central d'Affaires,
- les variables et paramètres d'entrée spécifiques du secteur Hauts de Seine Nord,
- les variables et paramètres d'entrée communs aux deux secteurs.



Les paramètres spécifiques aux secteurs Quartier Central d'Affaires et Hauts de Seine Nord sont au nombre de quatre :

- la durée de préparation,
- la durée de construction,
- le maximum de m2 de bureaux autorisés dans le secteur,
- un coefficient, modulable dans le temps, d'autorisation de lancement de nouveaux bureaux.

Les paramètres d'entrée communs sont au nombre de trois :

- la croissance économique à partir de 2002, variable d'année en année,
- un coefficient d'influence du BTP sur le développement économique dans le domaine de l'immobilier de bureaux,
- le délai de location dans le neuf et dans l'ancien.

Il serait très facile d'introduire d'autres paramètres d'entrée au niveau de l'interface d'utilisation, à partir de paramètres existant dans le corps du modèle.

2. - Variables de Sortie

Toutes les variables du modèle peuvent être tracées sur des graphiques d'évolution temporelle ou obtenues sous forme numérique.

Dans la page du Menu Général, trois boutons mènent à des graphiques de sortie (trois autres boutons permettent d'accéder aux sorties numériques).

La page de sortie graphique Quartier Central d'Affaires ou Hauts de Seine Nord comporte deux graphes : celui du haut permet d'accéder successivement (onglet en bas à gauche du graphique) à trois pages montrant, en fonction du temps :

- page 1 : le loyer moyen et l'évolution historique du loyer moyen,
- page 2 : la couverture et le taux de vacance (cette dernière variable est mesurée, elle n'a aucun rôle actif au sein du modèle),
- page 3 : la courbe de croissance économique, historique + scénario.

Le graphique du bas permet d'accéder à deux pages :

- page 1 : le parc des bureaux ; simulé et historique,
- page 2 : graphe des m² en préparation, en comparaison avec l'historique des bureaux autorisés.

Dans la page du Menu Général, le bouton « Sorties Graphiques Test » (et son équivalent « Sorties Numériques test ») permet d'accéder à une page comportant deux ensembles de graphiques sur lesquels on peut tracer, au gré de l'utilisateur, toutes les variables du modèle, de manière à analyser le pourquoi de certains comportements. Rappelons que chaque graphique ne peut comporter qu'un maximum de cinq courbes.

On peut accéder à un quatrième ensemble de graphes, à partir de la page Simulation, en cliquant sur le bouton Simulations Comparatives. Ces graphes (au nombre de sept dans la version actuelle du modèle, un graphe par variable, jusqu'à cinq simulations par graphe) permettent de faire des analyses de sensibilité par rapport à des paramètres que l'on pourra définir en cliquant sur le bouton Runs Comparatifs.

Annexe 3 : Utilisation de simulations comparatives

De telles simulations permettent de comparer, variable par variable, l'effet d'un changement de paramètre, de graphe d'entrée, de valeur initiale, au travers de différents scénarios.

A cette fin, une page « simulations comparatives » a été créée et propose quatre variables à comparer. Mais l'utilisateur est libre, pour les graphiques de sortie comme pour tous les autres, de définir toute autre variable qui paraîtrait intéressante d'analyser. La définition des simulations comparatives en fonction de certains paramètres, se fera en cliquant dans le pavé « Runs Comparatifs » (pour plus de détails sur la procédure, voir la rubrique « HELP » à droite de l'ascenseur horizontal du haut). Après une session de simulations comparatives, ne pas oublier de suspendre cette option en ouvrant la page « Runs Comparatifs » et en cliquant l'onglet « sensitivity on ».

Annexe 4 : La dynamique des systèmes complexes

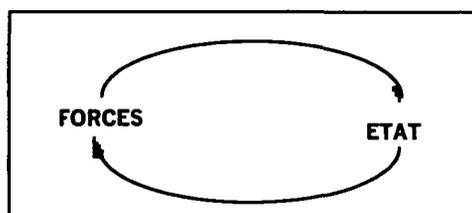
I - 1 - Définitions et Domaines d'Application

Le terme **Dynamique** sous-entend explicitement le mouvement, le changement. La Dynamique des Systèmes Complexes est la science du changement, de l'évolution. Mais, à la différence de la Cinématique, elle aussi science de la connaissance du mouvement, le concept de Dynamique implique l'analyse des **forces** qui créent le changement ou, au contraire, s'y opposent. Au-delà de la connaissance, le mot Dynamique implique une **compréhension** des phénomènes.

Tout comme le mouvement dans l'espace d'un mobile déformable, la dynamique est déterminée par l'ensemble des forces internes et externes qui agissent sur ce mobile. De même, le comportement des structures socio-économiques qui forment notre environnement, résulte d'un ensemble de forces, de poussées ou d'inerties sans cesse évolutives : forces économiques intrinsèques (structurelles) au système, viscosités socio-culturelles tempérant, ralentissant le changement, impulsions politiques plus ou moins imprévisibles pouvant, parfois, changer le cours des choses.

Ces forces, dont l'effet peut être représenté au moyen d'un système d'équations différentielles, modifient l'état du système caractérisable à chaque instant par un vecteur d'état. Mais ces forces ne sont pas figées, elles évoluent souvent de manière structurelle, c'est à dire en fonction de l'état de ce système qu'elles ont elles-mêmes contribué à changer.

On comprendra aisément la différence entre la notion de "force" et celle d'"état". Une bonne gestion, un contrat d'assurance solide, une trésorerie saine, constituent des piliers qui protègent de la catastrophe. Mais seule la recherche de clients, de contrats nouveaux constitue la force, la poussée qui assurent un développement de l'entreprise. Et l'on sait bien que la recherche de clients nouveaux (force active) est influencée par la situation financière (état du système) de la société, qu'elle peut se faire d'autant plus aisément que cette situation financière est saine.



Nous avons là une **boucle de rétroaction**, la première d'une longue série, cette boucle de principe symbolisant en réalité de nombreuses boucles imbriquées reliant dans les deux sens variables d'état et forces agissantes.

Naturellement, lorsqu'il s'agit d'une boucle unique, régulatrice ou au contraire accélératrice (cercle vicieux), l'analyse de son comportement est d'autant plus aisée que les

relations causales incluses dans la boucle sont linéaires. Quelques ouvrages récents donnent des exemples de comportement de telles boucles de rétroaction dans les domaines économiques et sociaux.

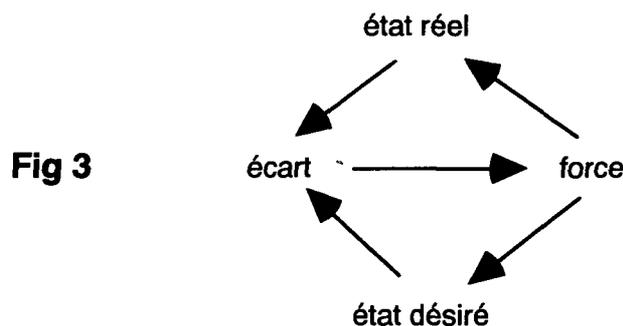
Une boucle régulatrice, stabilisatrice (on parle de "cercle vertueux", mais les spécialistes préfèrent la notion de "boucle négative"), tendra à amener de façon asymptotique, la structure correspondante vers un état d'équilibre :



alors qu'une boucle dite positive (le fameux "cercle vicieux") aura un comportement explosif ou implusif



Dans la réalité, il est très rare de voir apparaître une boucle de rétroaction isolée. Pour une raison de principe, ces boucles vont au moins par paire. Car une "force", telle que nous venons de la présenter, résulte toujours de, ou est influencée par, la comparaison entre deux "états" : le but d'une part, la réalité d'autre part. C'est la différence entre objectif et réalité qui pousse à l'action, qui génère donc une (ou des) force(s) qui aura pour effet de modifier à terme la réalité... et, plus tard encore, l'objectif.



Lorsque plusieurs boucles de rétroaction interagissent l'une avec l'autre, la science des asservissements permet encore une analyse - non intuitive mais mathématiquement rigoureuse - des modes de comportement d'un système linéaire. Notons toutefois que la compréhension de ces modes de comportements devient, dès ce stade, non intuitive et nécessite l'utilisation de techniques spécifiques relativement complexes (un exemple amusant a récemment été décrit par des spécialistes de la dynamique des systèmes complexes : se référant à une description du comportement présumé explosif de deux boucles imbriquées stabilisatrices, ils montrent combien il est facile, si l'on n'y prend pas garde, de se fourvoyer dans des raisonnements faux).

Alors qu'un réseau complexe de relations ne comportant aucune boucle de rétroaction, n'est que l'accumulation de relations élémentaires. Que l'analyse d'un tel réseau est relativement aisée et sans surprise, surtout si l'on s'aide de l'informatique. En revanche, le comportement temporel d'un réseau comportant plusieurs boucles interconnectées ne peut pas se déduire aisément de l'analyse du comportement individuel de chaque boucle. Un simple exemple suffira pour illustrer ce propos. L'interconnexion de deux schémas bouclés, dont les comportements individuels possibles sont limités aux quatre courbes décrites précédemment, peut donner lieu, entre autres, aux comportements types suivants :

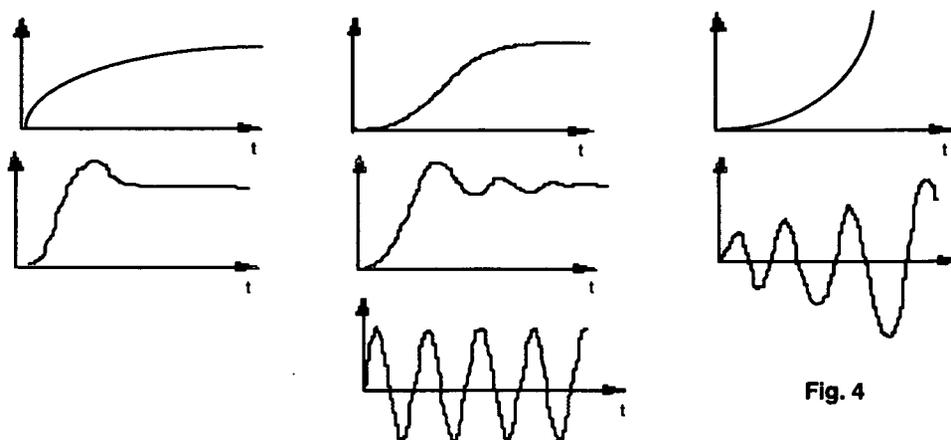


Fig. 4

L'addition de boucles supplémentaires, interconnectées avec les précédentes, accroîtra encore la complexité de comportement du système (nouvelles fréquences propres, oscillations plus ou moins amorties, avec fréquences variables, etc.). Bien que déterminés, répétitifs et théoriquement prédictibles, ces comportements sont suffisamment complexes pour ne pas pouvoir être intuités avec exactitude (ne parlons même pas de précision) sans l'aide d'outils spécifiques.

Or ces outils existent.

Il s'agit d'une part de la science des systèmes asservis (feedback theory) qui permet d'analyser et le plus souvent de prévoir les comportements dynamiques des structures correspondantes, et de suggérer le cas échéant des modifications sans faire appel à une expérimentation qui, dans le domaine des sciences sociales, est en général impossible.

Il s'agit aussi des outils de simulation sur ordinateurs, outils depuis longtemps utilisés en aéronautique (oserait-on, de nos jours, faire voler un avion, une fusée, sans en simuler auparavant le comportement dynamique dans toutes les circonstances imaginables, y compris des conditions extrêmes d'utilisation ?), lors de la construction de réacteurs nucléaires, ou en météorologie, et qui deviennent de plus en plus faciles à utiliser dans les domaines plus ou moins "flous" qui nous concernent.

Nous reviendrons plus tard sur l'utilité de la simulation lorsqu'on désire dépasser le seul stade de l'analyse purement intuitive et qualitative. Mais, dès à présent, nous devons insister sur la nécessité d'utiliser les outils cités ci-dessus (théorie du feedback et simulation) lors de toute étude un peu détaillée des systèmes réels comportant, comme c'est presque

toujours le cas, des structures bouclées. Et ce d'autant plus que ces boucles, souvent complexes, font appel à trois notions fondamentales :

- la notion de **Retard** ou **Délai** entre cause et effet.
- le principe de **non-linéarité**.
- le principe d'**évolution** des structures.

I - 2 - Les Retards

Dans la réalité qui nous environne (entendons par-là tous les domaines pratiques qui sont du ressort de la dynamique des systèmes complexes : économie, finances, sociologie, management, etc.), les relations d'influence, lorsqu'elles ne sont pas de nature purement comptable, comportent presque toujours des délais qui représentent la non-instantanéité des relations de cause à effet.

Ainsi suggérée, cette notion de retard paraît évidente. Ce qui l'est moins, c'est l'accumulation, disons plutôt la combinaison des délais ; combien de managers, combien de décideurs ont été étonnés de ne pas obtenir, dès que prévu, les résultats espérés de leurs décisions. Ils avaient bien tenu compte de chacun des délais, mais pas de leur combinaison dans une structure complexe.

Prenons un exemple dans le domaine des structures d'information, en se basant sur la boucle **Information - Décision - Action - Résultat (IDAR)**, constituée en réalité de multiples boucles semblables interconnectées, toute décision étant prise en général sur la base de plusieurs informations.

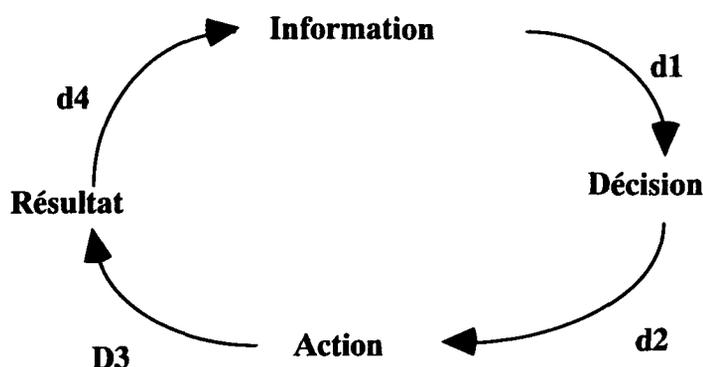


Fig 5

La relation d'influence qui lie chacune des variables ci-dessus, est soumise à un délai. Mais certains de ces retards peuvent eux-mêmes dépendre d'autres délais. Par exemple, si le résultat **R** dépend de la période de l'année à laquelle l'action **A** est commencée (effet de saisonnalité), alors les délais

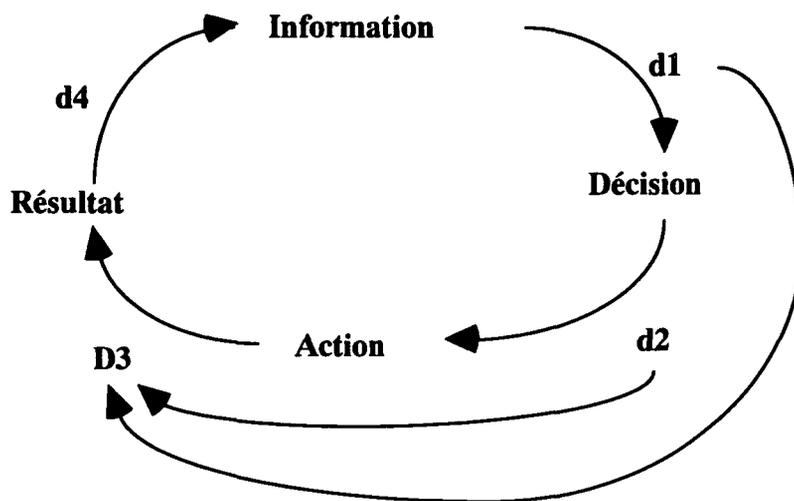


Fig 6

d1 et **d2** qui retardent la décision et le démarrage de l'action, influenceront **D3**, rendant la dynamique, c'est-à-dire le mode de comportement du système, bien plus complexe que prévu. On comprend alors que seule une simulation puisse effectivement rendre compte et représenter une telle combinaison de retards.

Par ailleurs, ceux-ci sont souvent connus avec une très grande imprécision. On sait qu'ils existent, on sait qu'ils ont un effet, mais on ne sait pas les mesurer. Souvent c'est le modèle et les simulations correspondantes qui nous amènent à proposer à l'expert, au décideur, les valeurs de certains délais, valeurs qui seules permettent de retrouver correctement la réalité. Dans ce cas, au-delà d'une compréhension permettant une représentation valable de la réalité, le modèle permet d'en affiner, d'en préciser la connaissance.

Lors des premières tentatives de modélisation du marché pétrolier mondial (modèle MARPET, réalisé et utilisé pendant plus de 10 ans au sein de ELF-Aquitaine), on a introduit de nombreuses variables, soit de retard, soit au contraire d'anticipation des phénomènes. En particulier, on pensait que les acteurs de ce marché mondial du pétrole brut avaient anticipé, en 1978, avec au moins six mois d'avance la crise à la fois politique et pétrolière qui secouait l'Iran et allait déboucher, au début de 1979, sur le départ du Shah et, entre autres conséquences brutales, à un arrêt quasi-total de la production iranienne de brut.

Or, avec un tel horizon d'anticipation (6 mois), le modèle ne fonctionnait pas bien et représentait mal la réalité, c'est-à-dire, en particulier, la brutale flambée des prix. Ce n'est qu'en réduisant cet horizon à 6 semaines que l'on put faire correspondre simulation et réalité. Une analyse à la loupe des données historiques permet de constater, en effet, une réaction très tardive du marché, quelques semaines seulement avant les événements, et non quelques mois comme modélisateurs et experts pétroliers l'avaient naïvement pensé a priori.

Il s'agit là d'un exemple réellement vécu où la modélisation aide l'expert à mieux connaître, à chiffrer plus exactement des relations d'influence ainsi que des données qui sont parfois difficilement mesurables ou, plus prosaïquement, qu'on n'a simplement pas eu l'idée de mesurer.

I - 3 - Les non-linéarités

Dans la réalité du monde qui nous entoure, la plupart des relations d'influence entre variables comportent un élément de non-linéarité, de non-proportionalité entre cause et effet. Cette constatation ne facilite ni l'analyse formelle (mathématique), ni la compréhension du comportement temporel des structures étudiées. Les graphiques de la Figure 3 avaient été générés par l'interconnexion de deux boucles ne comportant que des relations linéaires représentant les dynamiques d'une population dont natalité et mortalité dépendent de cette même population. L'adjonction de non-linéarités au sein de ces deux boucles enrichirait infiniment le comportement, par exemple comme suit (le graphique de la figure 7 mérite, par son apparence chaotique, son sous-titre tiré d'une nouvelle de Salman Rushdie), mais ce n'est là qu'une des nombreuses possibilités de comportement non-linéaire, dont on notera qu'il s'agit là d'un "chaos" déterministe, donc analysable, prédictible et à la limite maîtrisable :

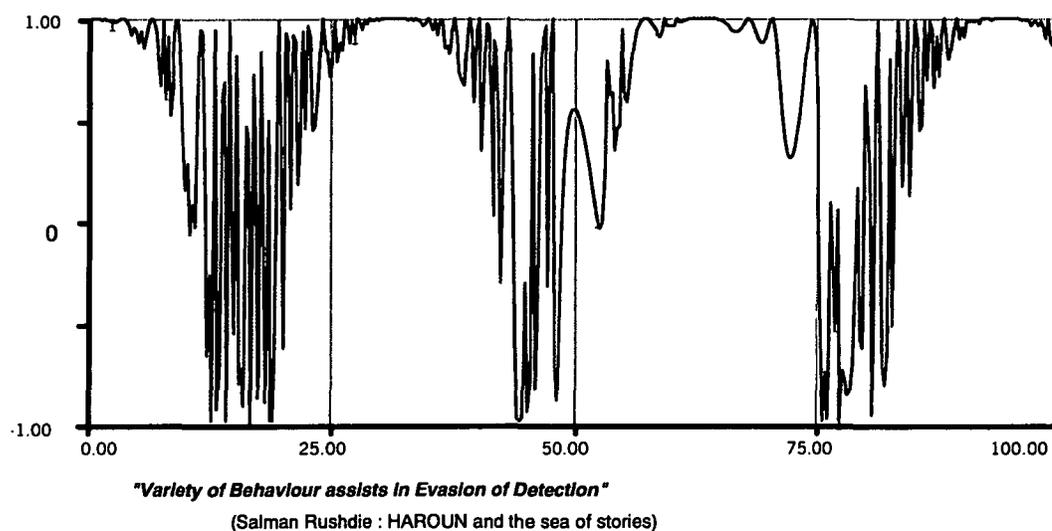


Fig. 7

Malheureusement, les possibilités d'analyse explicite d'un système d'équations différentielles non-linéaires, sont encore limitées. C'est là une raison supplémentaire pour faire appel et aller jusqu'au bout du processus de simulation, afin de pouvoir analyser des comportements complexes, afin aussi de mettre en évidence des phénomènes inattendus, contre-intuitifs, parfois fugitifs et pouvant donc aisément passer inaperçus.

I - 4 - L'Évolution Structurelle

Nous n'entendons pas par-là l'apparition de relations causales ou structurelles nouvelles, correspondant à une évolution imprévisible et jusqu'alors inconnue du système en cause. De telles évolutions, qui relèvent de la notion de création humaine, ne sont pas - ou pas encore - du ressort de la dynamique des systèmes (contrairement à la possibilité d'auto-organisation, que l'on peut aisément modéliser et simuler).

Prenons un exemple :

Dès la plus haute préhistoire, on sait que l'être humain fut à la fois prédateur et destructeur - ou tout au moins transformateur - de son environnement. Ainsi, dans son désir d'étendre les zones cultivables autour de son lieu d'habitation et d'activité, l'homme ne cessa d'abattre des arbres, d'arracher des forêts. Pour cela il fabriquait des haches avec les ramures des cerfs habitant la forêt environnante. Plus il agrandissait son domaine en détruisant la forêt, plus les cerfs s'éloignaient dans ce qui restait de la forêt, plus il devenait difficile de trouver des ramages et de fabriquer l'outil nécessaire à l'abattage des arbres. Une telle évolution de la situation, très aisément modélisable et simulable, se traduit, tant dans un modèle que dans la réalité, par une stabilisation progressive de la situation : une forêt aux frontières suffisamment éloignées pour empêcher l'homme d'acquérir l'outil permettant d'étendre son domaine.

Alors - au bout de combien de millénaires ? - l'homme découvrit le fer et se mit à l'utiliser à la place des ramures de cerf, pour poursuivre le défrichage de la forêt et accroître infiniment sa zone d'activité. Cette issue - qui n'était d'ailleurs pas la seule possible - est de nature imprévisible et n'est donc pas incorporable à priori dans une analyse et une modélisation du processus.

Par contre, si la création de structures nouvelles n'est pas encore du ressort de notre science, l'évolution des structures est parfaitement analysable et souvent prévisible.

Lors d'une analyse un tant soit peu approfondie d'un système socio-économique réel, on constate vite que les relations entre variables ainsi que les boucles de rétroaction mises en évidence, ne sont pas toutes actives au même moment. Selon l'évolution du système, selon l'état dans lequel il se trouve à un instant donné, telle boucle pourra être active ou pas, prédominante ou sans effet. Il en résultera une possibilité de changement, parfois radical, parfois très rapide, de comportement. En fait, ce changement structurel constaté est prévisible, car contenu implicitement dans la structure.

Prenons l'exemple de certains marchés de matières premières. Nombre d'entre eux passent périodiquement de l'état de marché de vendeurs à celui d'acheteurs. En fait, quelque soit son état à un instant donné, un tel marché comporte en son sein le principe embryonnaire d'un changement d'état à venir.

Si, par exemple, le marché est "vendeur", la production étant inférieure à la demande pour des raisons probables d'insuffisance de capacité de production, les prix (force) vont croître, ce qui génèrera à terme (délai) à la fois une certaine baisse de la demande (bien qu'au début il y ait danger d'apparition d'achats de couverture qui accélèreront encore la hausse des prix : cercle vicieux, boucle accélératrice) et une hausse des investissements pour satisfaire la demande dans un domaine qui paraît rentable.

C'est ce croisement entre baisse de la demande et hausse des capacités de production qui fera passer le système de l'état de vendeur à celui d'acheteur (le même raisonnement,

prolongé, montrerait la probabilité raisonnée d'un nouveau changement ultérieur du mode de comportement du système).

Ces modes de comportement du marché sont en général très différenciés les uns des autres; le passage de l'un à l'autre peut être brutal, la transition peut être plus ou moins courte. Mais dans presque tous les cas, les changements à venir, lorsqu'il ne s'agit pas de création de nouvelles structures jusqu'alors inconnues, sont analysables, modélisables, quantifiables et prévisibles. Un modèle bien conçu aura tous les éléments pour représenter et générer (prévoir) le changement de structure et de comportement, de manière quasi automatique et plus ou moins continue.

Mais prévisible ne veut pas dire prévu. On a du mal, en effet, à concevoir une réalité anticipée qui soit vraiment différente du présent, à agir en fonction d'une structure future dont le comportement semble nouveau, inconnu. Combien d'analystes, combien de décideurs, savent anticiper de tels changements et prendre des décisions en fonction de structures, de situations futures prévisibles, d'évolutions déjà rencontrées dans le passé, mais oubliées depuis longtemps?

Potentiellement, c'est là un atout majeur de la dynamique des systèmes complexes, que de pouvoir aider à analyser, à prévoir, à comprendre les changements structurels de comportement implicitement inscrits dans de nombreux systèmes.

En contrepartie, on constate, contrairement à ce que l'on pourrait penser intuitivement, qu'un modèle représentatif et fiable d'une réalité complexe, bien que toujours réducteur de la réalité, est "plus complexe que la réalité". Car il représente non pas une réalité, mais une succession, un empilement de réalités potentielles et évolutives qui, toutes implicitement contenues dans l'analyse, ne se manifestent et n'agissent qu'à tour de rôle. Plutôt qu'une photo, c'est le film d'une réalité mouvante qui se déroule lors de toute simulation dynamique.

Résumons :

1) La Dynamique des Systèmes Complexes étudie le mouvement, le comportement de systèmes dont la structure et les frontières, bien que déterminées, peuvent être changeantes, donc pas forcément connues d'avance.

2) La priorité est donnée à l'analyse des forces qui causent le changement, forces structurelles qui sont rarement figées et qui peuvent évoluer en fonction de ces mêmes changements d'état.

3) Les comportements dynamiques de tels systèmes sont fortement influencés par l'existence de boucles internes de rétroaction, boucles dont l'influence ne peut être que très difficilement perçue par l'être humain dès lors que le système est un tant soit peu compliqué (plus de trois boucles imbriquées, simultanément actives et non-linéaires).

4) Notons qu'une analyse détaillée des forces en présence, si le système est non-linéaire et comprend plusieurs boucles de rétroaction, implique une étude en continu (par opposition à la simulation discrète). A cause de ces phénomènes de non-linéarité et de bouclage, il faut considérer l'avenir comme le résultat de petits pas en avant. La dynamique

des systèmes complexes, sans exclure les discontinuités tant structurelles que conjoncturelles, est basée sur l'analyse de l'évolution continue des phénomènes (ce qui sous-entend aussi l'utilisation de techniques de simulation continue).

On peut se poser la question de savoir comment se situe la dynamique des systèmes complexes par rapport à quelques autres démarches et techniques utilisées pour l'analyse de la réalité au sein de laquelle nous évoluons. Le schéma de la figure 8 place la dynamique des systèmes en relation avec quatre autres groupes de démarches ou techniques :

- les tableurs
- l'Intelligence Artificielle
- la démarche appelée aux U.S.A. : System Thinking
- les "hyper" complexités dont nous avons déjà parlé précédemment

Il est important de noter dans ce schéma, d'une part qu'il existe de nombreuses interconnexions, des interdépendances entre ces différentes branches de l'analyse de la complexité, d'autre part que la dynamique des systèmes comporte des éléments, des zones de spécificité par rapport aux autres démarches. Les mots-clefs notés sous **dynamique des systèmes**, résument ces spécificités : **analyse quantitative** (à la différence de la démarche "System Thinking") de **comportements complexes** (complexité temporelle et non spatiale) dus à la présence quasi inévitable de **boucles de rétroaction** (difficilement prises en compte par l'I.A. dès lors que ces boucles apparaissent en assez grand nombre), dans un but **d'application pratique de compréhension, de connaissance et d'action.**

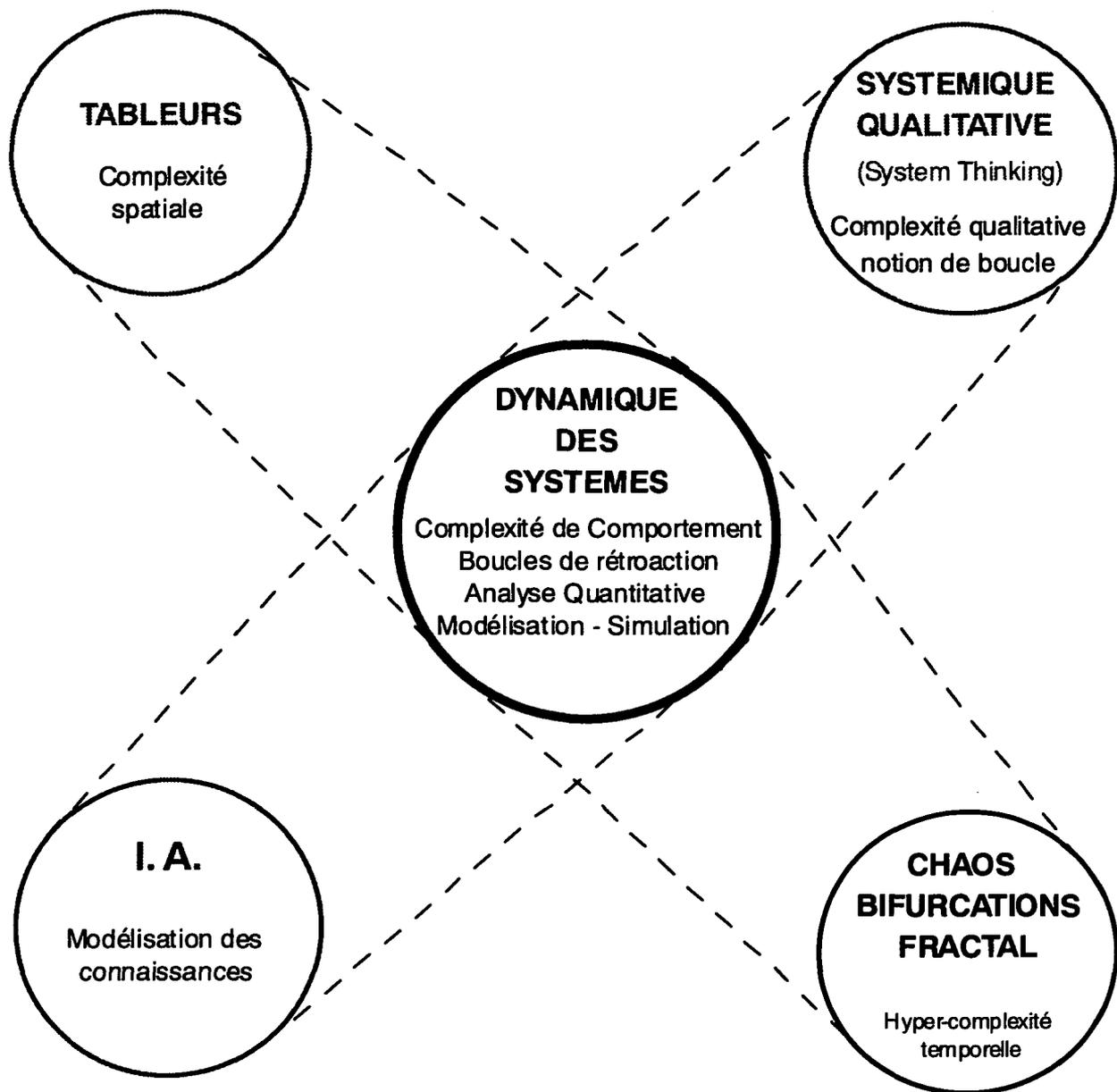


fig. 8

II - Le Processus et les Étapes d'Analyse

Le schéma qui suit (Figure 9) résume les étapes possibles, souvent obligatoires du processus d'analyse de toute réalité complexe.

Ce graphique montre :

- les étapes de travail : analyse causale, modélisation, simulation.
- ce qu'apporte chaque étape : perception ordonnée du problème, compréhension structurelles, connaissance détaillée, ...
- les rétroactions possibles du travail d'analyse sur la réalité.

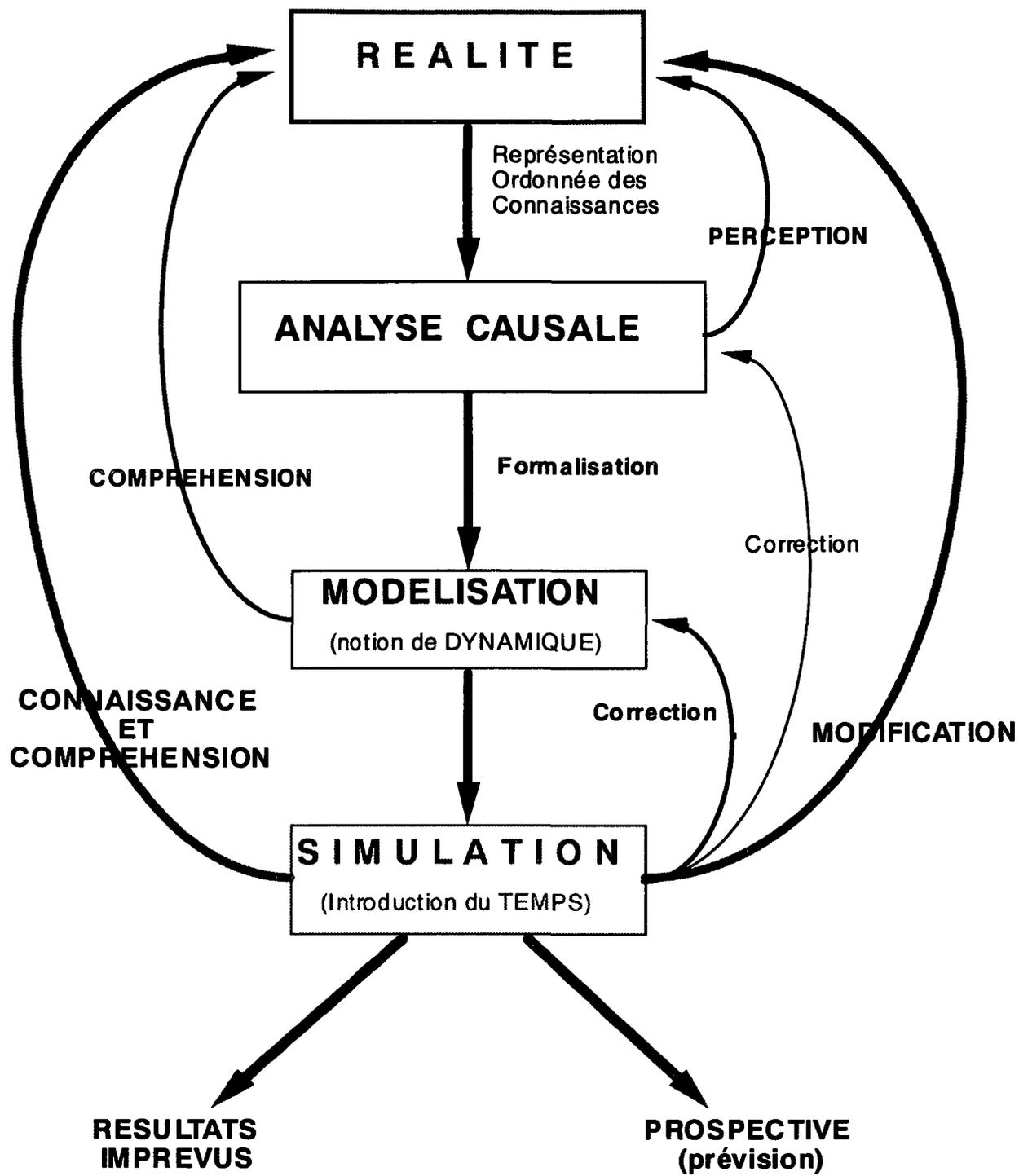


fig. 9

II - 1 - L'Analyse Causale

D'une manière générale, la dynamique des systèmes est utilisée lorsqu'on devient conscient qu'une structure, un problème, deviennent trop complexes pour en comprendre facilement les comportements passés, présents, et surtout à venir. Commence alors l'étape d'analyse causale, que l'on peut aussi appeler **analyse structurelle** du problème (cette phase qualitative n'est pas très différente de celle utilisée dans l'approche appelée justement Analyse Structurelle). Elle permet, en effet, de structurer le problème, mais aussi de le décomposer en sous-ensembles, en éléments simples, qui pourront être analysés individuellement. C'est une phase indispensable qui enrichit énormément la perception globale du "système" étudié, tout en générant une impression de plus en plus forte, parfois inquiétante et même déstabilisante, de la complexité des phénomènes.

A supposer qu'il soit arrêté à ce stade - ce qui arrive assez souvent -, le travail d'analyse qualitative aura rendu les participants sans doute plus sages, plus humbles, mais plus perturbés aussi, et il n'aura apporté qu'assez peu de connaissances nouvelles précises et guère de compréhension quant à la dynamique des phénomènes déjà rencontrés ou que l'on voudrait essayer de prévoir.

II - 2 - La Modélisation

Après l'analyse de causalité structurelle, vient la phase de **modélisation**. Si l'on se souvient que le but premier de tout ce travail est de connaître l'évolution en fonction du temps d'un système, on comprendra que l'on cherche à formaliser le problème d'une manière qui soit adaptée à ce but. En d'autres termes, on veut définir les équations différentielles qui puissent représenter un système en mouvement.

La résolution numérique d'un système d'équations différentielles est chose connue depuis longtemps. Toutefois dans le domaine des sciences sociales, un tel système d'équations différentielles, s'il peut formaliser correctement une structure dont on veut analyser le comportement, ne peut représenter rien de réel. Dans la nature, les effets s'accumulent, ils ne proviennent pas d'un processus de dérivation ; une vitesse, lorsqu'elle est mesurée comme la dérivée d'une distance parcourue en un temps donné, est une **information** ; par contre, c'est une variable physique lorsqu'on la considère comme résultant d'une accélération et comme étant la cause d'une distance parcourue.

Précisons quelque peu notre pensée à l'aide d'un exemple.

Pour aller d'un endroit à un autre, on parcourt une distance grâce à la vitesse acquise qui elle-même résulte de l'accélération donnée au véhicule (notions d'intégrale, d'accumulation).

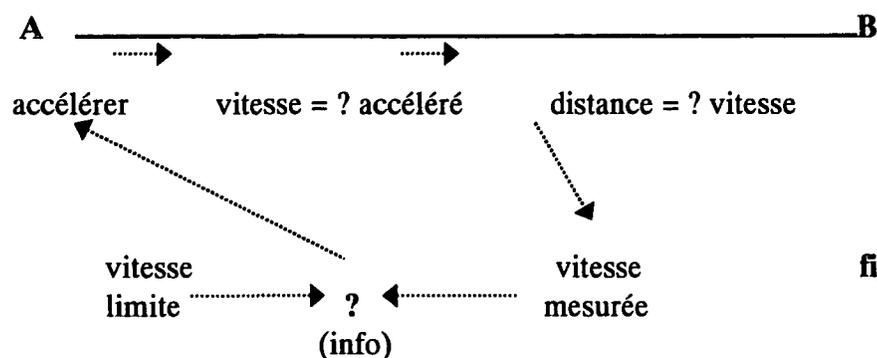


fig. 10

D'un point de vue causal, la vitesse ne résulte pas de la distance parcourue, c'est au contraire la distance qui dépend de la vitesse. On mesure toutefois la vitesse à laquelle on roule (vitesse mesurée) en dérivant la distance - c'est là le rôle du compteur de vitesse - . Si cette vitesse, qui est une information, est supérieure à une vitesse limite, qui est une autre information, on peut être amené à réagir en diminuant l'accélération (freinage). La causalité du mouvement "monte" de l'accélération vers la distance parcourue, mais des rétroactions peuvent exister, passant par des variables d'informations pouvant être instantanées, retardées, dérivées, etc.

Un des principes constants de la dynamique des systèmes complexes étant de ne représenter, dans toute la mesure du possible, que des relations correspondant à une réalité tangible, à une causalité effective et clairement perçue, au lieu de représenter la notion de dérivée, on choisira celle d'accumulation, d'intégrale. On écrira un système d'équations intégrales, laissant l'ordinateur, au moyen de logiciels appropriés, simuler la résolution d'un système d'équations différentielles (en réalité un ensemble d'équations intégrales).

On ne décrira pas ici la symbolique utilisée, qui a parfois été décrite comme trop simpliste. Rappelons seulement que la séparation des variables d'un système en niveaux (accumulation), en flux de "matière" (cette matière pouvant être une quantité ou même une qualité d'information, de l'argent, des décisions, etc.), en informations correspondantes et en variables de décision, représente bien la réalité physique telle qu'elle est mais surtout telle qu'elle se perçoit assez aisément par ceux auxquels s'adresse le travail de simulation.

Toutefois nous pensons utile de montrer brièvement le processus de réflexion qui est à la base de la modélisation en dynamique des systèmes et qui permet de démarrer la formalisation de tout problème nouveau.

1 - Partant d'un schéma causal, choisir les variables qui paraissent être des variables d'accumulation. Le critère de choix est simple : une variable d'accumulation a pour particularité de rester figée lorsque, pour une raison ou une autre, le fonctionnement du système s'arrête ("le temps se fige").

Exemples :

1.1 - pendant les vacances du mois d'août en France, la majeure partie de l'activité industrielle s'arrête. Production et consommation tombent à zéro (au moins en ce qui concerne les biens industriels), mais, stocks, carnets de commande, prix, capacités de production

(usines) se figent à la dernière valeur acquise lors de la période d'activité. Ce sont là des variables d'accumulation.

1.2 - Lorsqu'on arrête de la remplir, le niveau d'eau dans une baignoire reste constant. De plus, on ne peut la vider instantanément, à l'inverse d'une douche dont on peut arrêter à tout instant et sans délai le débit. Ce niveau est donc une variable d'accumulation (on utilise aussi le terme "variable de niveau" qui peut se comprendre aisément en référence à l'exemple de la baignoire).

1.3 - Dans le domaine plus inhabituel des relations psychosociologiques, des variables comme l'inhibition, les cognitions, les niveaux d'appartenance, la satisfaction cumulée, etc. sont des variables d'accumulation qui ne peuvent s'annuler ou changer de valeur brutalement.

2 - Une fois choisies quelques variables d'accumulation (il n'est pas nécessaire dans un premier temps d'être exhaustif), il faut se poser la question : quels sont les flux qui remplissent ou qui vident ces variables de niveau ? Là aussi il n'est pas nécessaire d'être tout de suite exhaustif, mais il est bon de se souvenir qu'un niveau sans flux d'entrée sera vite "vidé", et qu'en l'absence de flux de sortie, il explosera (le cas échéant, les premières simulations se chargeront vite de le montrer).

3 - De quoi dépendent ces flux, c'est à dire de quelles variables d'information ou de décision, de quelles influences, de quelles contraintes ?

En procédant dans cet ordre, on arrivera à un modèle ordonné et bien vite, hélas, complexe, aussi complexe que la réalité que l'on veut modéliser et analyser. Cette complexité ne doit pas nous effrayer. Notre but, en effet, n'est pas de simplifier une réalité complexe, mais bien plutôt de décomposer, d'ordonner cette complexité de manière à la rendre compréhensible.

La phase de modélisation, si elle constitue l'étape indispensable à toute analyse dynamique quantifiée des phénomènes, est à la fois ardue et déconcertante. Le progrès semble lent, c'est la phase "fourmi". D'une part, elle nécessite une certaine compétence en modélisation, pour éviter de représenter n'importe quoi, n'importe comment. D'autre part sa progression est lente, car à ce stade interviennent les difficultés de quantification.

La recherche, en effet, des éléments - constantes, paramètres, variables, relations non-linéaires - qui participent à la génération du mouvement, est inhabituelle et fait appel à des données qui souvent ne sont pas connues, ne font pas partie des statistiques disponibles. Ces dernières résultent plutôt d'une tendance à la décomposition et à la représentation spatiales que d'une recherche de causalité de comportement. Les statistiques décrivent une situation, éventuellement une série de situations en évolution, mais ne sont pas destinées à déterminer les causes d'une telle évolution. Elles répondent à la question : combien mais restent muettes devant la question comment. Par contre la Dynamique des Systèmes Complexes, dans sa recherche de causalité qui est une de ses raisons d'être, fait appel à des notions et des relations

nouvelles qui nécessitent, plutôt que des données, des connaissances souvent difficiles à obtenir car représentant avant tout l'expérience des personnes compétentes (experts, spécialistes, décideurs), des connaissances se forgeant essentiellement au niveau de leur modèle mental.

Constituant une phase ardue, relativement lente et peu glorifiante du travail, la modélisation oblige à une nouvelle représentation de la réalité, une représentation inhabituelle, souvent rejetée comme inquantifiable donc inutile, alors même que tout comportement dynamique provient justement de l'existence - quantifiable mais non mesurée - de ces relations insoupçonnées. Le processus de modélisation reste donc indispensable si l'on veut aller au-delà de la seule analyse causale qualitative des phénomènes, et rendre compte de dynamiques complexes de comportement.

II - 3 - La Simulation

Il reste alors la phase de simulation, celle qui permet de :

- 1 - tester le modèle, en introduisant enfin explicitement la variable temps.
- 2 - analyser les dynamiques possibles, mettre parfois en évidence des comportements imprévus.
- 3 - réaliser et étudier des scénarios qui seront toujours moins coûteux que des essais réels (souvent impossibles d'ailleurs à mettre en oeuvre, en particulier dans le domaine des sciences sociales).
- 4 - faire de la prospective (souvent le but implicite de toute étude).
- 5 - modifier le modèle mental et l'expertise des décideurs et des spécialistes.
- 6 - s'attaquer éventuellement à la phase ultime, à savoir les modifications de structure destinées à générer les comportements désirés (modification de la réalité).

Parmi les buts énumérés, certains sont évidents et on ne s'y attardera pas. Par contre, on utilisera des exemples de modèles effectivement réalisés, utilisés et parfois publiés pour montrer des résultats concrets de notre démarche et par-là même démontrer l'utilité, au-delà de la modélisation, de la phase de simulation, c'est-à-dire de l'utilisation extensive des modèles.

C'est ainsi que, parmi les six types d'application cités ci-dessus, le deuxième - résultats imprévus - sera traité à travers un exemple d'application dans le domaine de l'environnement (de la possibilité d'apparition de catastrophes différées). Le troisième type d'application - scénarios - sera étudié à travers l'analyse des structures d'information (ce que nous appelons les boucles IDAR (Information - Décision - Action - Résultat) ainsi que par l'étude des dynamiques de comportements motivationnels (modèle MODÉRÉ). L'approche "prospective" nous donnera l'occasion d'analyser le marché pétrolier, enfin les modifications de structure sont à la mode sous le nom de BPR (Business Process Reengineering) et, plus récemment, de "Balanced Scorecard".

Quant au point 5, à savoir la mise à jour et la modification éventuelle du modèle mental des experts ayant participé à la mise au point du modèle, notons que seules des simulations en grand nombre, montrant divers avenir possibles, parfois catastrophiques, parfois irréalistes, en réponse à des scénarios très variés, peuvent amener ces experts à modifier partiellement leur analyse. La simulation (le vécu en raccourci de scénarios difficilement réalisables en temps réel) contribue en quelque sorte à faire évoluer l'expertise, accroissant ainsi la fiabilité et la durée de vie des modèles correspondants. Ce processus d'évolution - qui se répète souvent de manière itérative - constitue un apport fondamental de la dynamique des systèmes au "savoir" des experts dans les domaines évolutifs des sciences sociales, en économie et en finances en particulier, c'est à dire dans des domaines où l'avenir n'est jamais semblable au présent, jamais vraiment répétitif.

II - 4 - La Validation

La validation d'un modèle représentatif d'un système complexe peut, en principe, se faire de trois façons :

- vérification expérimentale, in situ, quantitative ou qualitative, valable surtout pour les systèmes physiques ;
- avis d'experts qui peuvent confirmer ou au contraire mettre en doute, sur la base de leur expérience, la validité de certaines hypothèses, de certains résultats ;
- simulation partielle ou totale du système considéré et analyse des modes de comportement obtenus.

Plus le système est complexe dans ses modes de comportement, dans sa structure aussi, moins l'expérimentation est aisée. Un système complexe comporte, en effet, de nombreuses variables d'entrée qui peuvent être à un moment ou à un autre influencées par le comportement, l'évolution du système (il s'agit là d'un feedback classique où le système rétroagit sur les entrées). D'où la difficulté de concevoir une expérimentation qui tienne compte de ces rétroactions dont l'effet peut être très important. Remplacer, en vue d'une mesure, une structure complexe par une boîte noire, revient parfois à créer cette simplification trompeuse et réductrice citée en introduction.

Les avis d'experts sont, quant à eux, essentiels pour déterminer les "fonctions de transfert" entre variables, ces relations qui rendent compte du fonctionnement, du mode opératoire d'un objet complexe. Ce sont les experts qui, en se basant sur leur expérience, leur connaissance du sujet, peuvent proposer mais aussi confirmer ou critiquer les modèles fonctionnels qui leur sont soumis.

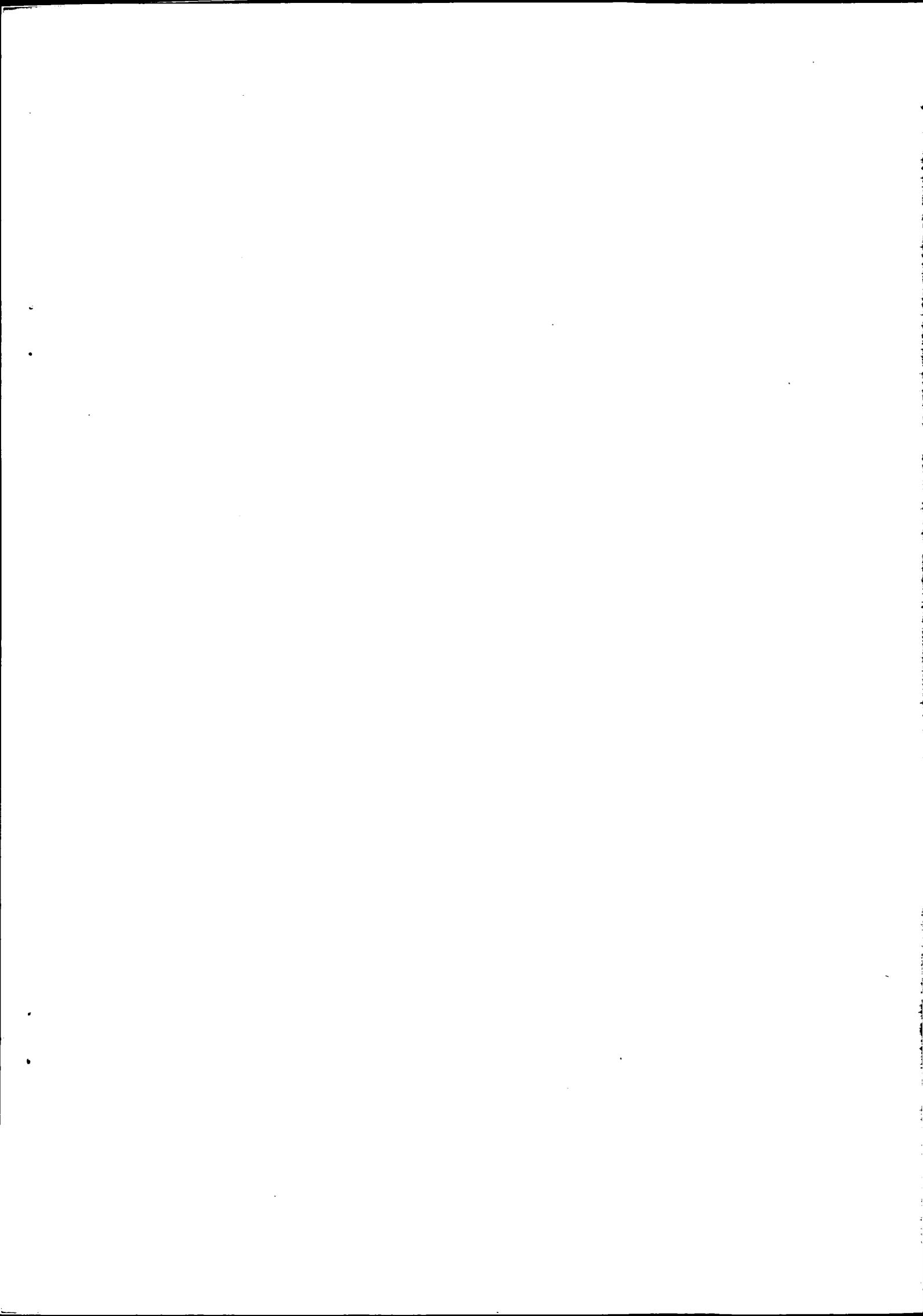
Mais, dès lors que la structure se complique, que le temps intervient pour générer des comportements complexes, souvent inattendus, ni l'expérimentation n'est aisée, ni les experts ne sont à leur aise pour analyser à priori ce qui va ou qui risque de se passer.

Dans ces cas de dynamiques complexes, seule la simulation permet à la fois de guider l'expert dans son analyse, mais aussi de proposer des expérimentations nouvelles qui tiennent compte de ces dynamiques tout en les mettant en évidence.

De telles simulations peuvent se faire *in abstracto* lors de la mise au point et du test du modèle, mais doivent se conclure sur des cas réels si l'on veut valider l'ensemble d'un modèle, comparer les simulations à certaines réalités connues, donner aussi un sens pratique à l'outil ainsi réalisé.

¶

L'utilisation du terme "certaines réalités connues" nous ramène aux notions déjà exposées, à savoir d'une part les photos de situations statiques (la réalité connue par instants, par échantillonnage), pouvant au mieux donner lieu à une succession de descriptions, d'autre part un film - autrement plus riche - donnant une représentation, une simulation d'une réalité mouvante.



**direction
des Affaires
économiques
et internationales**

**Service
économique
et statistique**

**Tour Pascal B
92055 La Défense
cedex
téléphone :
(33/0) 1 40 81 13 15
télécopie :
(33/0) 1 40 81 13 30
[www.equipement.
gouv.fr/statistiques](http://www.equipement.gouv.fr/statistiques)**