



Chaire ParisTech Modélisation prospective
au service du développement durable

Les modèles, outils de prospective dans le débat climatique

Nadia Maïzi^{1,2}

¹Centre de Mathématiques Appliquées
MINES ParisTech

²Chaire Modélisation prospective au service du développement durable
ParisTech

Eclairer le long terme



Chaire ParisTech Modélisation prospective
au service du développement durable

Jouer un Jeu en mouvement

Autour de G. Berger, quelques **précurseurs dans les années 1950** constatent pour leurs contemporains

- que le changement s'opère de plus en plus rapidement
- que l'on ne peut plus vivre sur ses acquis
- que tout, partout, sans cesse est remis en question
- que l'avenir s'ouvre sur tout un champ de possibles, en bien, en mal, . . .

Notre civilisation est comparable à une voiture qui roule de plus en plus vite sur une route inconnue lorsque la nuit est tombée. Il faut que ses phares portent de plus en plus loin si l'on veut éviter la catastrophe.

En 2010, cette accélération et cet enchevêtrement s'amplifient

Pour regarder l'avenir en face

Les disciplines prospectives se nourrissent mais se distinguent de la Prévision et de la Rétrospective

- 1 L'idée classique de **Prévision** impose le futur qui est à deviner
 - ☞ *Il s'agira pour la Prospective de construire l'Avenir*
- 2 L'attitude **Rétrospective** s'exerce souvent comme fascination du passé selon le tryptique **précédent, analogie, extrapolation**
 - ☞ *Il s'agira pour la Prospective d'extraire du Passé sa quintessence*

Les horizons de la Prévision et de la Prospective

La Prévision est à court terme

Elle conduit à des décisions immédiatement exécutables et engage souvent de façon irréversible.

La Prospective est à objectifs éloignés

Elle peut nous amener à modifier profondément nos projets à long terme.

Il ne s'agit pas de choisir entre prévision et prospective, mais de les associer. Chacune exige l'autre. Il faut, à la fois, savoir dans quelle direction l'on marche et s'assurer de l'endroit où l'on va poser le pied pour le prochain pas. (Gaston Berger)

Hier et Demain sont hétérogènes: entre Rétrospection et Prospection

Une étude Rétrospective

- se tourne vers le passé
- c'est un regard qu'on y jette

Une recherche Prospective

- se tourne vers l'avenir
- c'est un projet qu'on forme

Passer de la Rétrospection à la Prospection

- Cela n'est pas simplement diriger ailleurs son attention
- C'est se préparer à l'action

Du passé, l'homme d'action doit savoir dégager des éléments permanents et des règles efficaces. (Gaston Berger)

Prospective et Aide à la décision

La Démarche

Explorer le futur
à partir de la
connaissance du présent et
du passé

L'Objet

Dans le but d'examiner les
évolutions possibles
en fonction
des décisions prises, des
actions réalisées.

*La prospective regarde en avant.
Le regard est pour elle le premier temps de l'action*

Pierre Massé

Construire l'avenir, ne pas le deviner

Faire face pour le décideur = Evaluer le champ des possibles

- Avenirs **imaginables ou non imaginables**
pas d'exhaustivité, possibilités de "rater" des ruptures :
exemple du transport au *XVIII^e*
- Avenirs **plausibles ou non plausibles**
réalisable (praticable):
respect des contraintes physiques, économiques, politiques,
sociales
- Avenirs **souhaitables ou non souhaitables**

Importance du **raccordement au réel** des avenir imaginés

☞ quels outils, quels modèles pour cette construction ?

Les Modèles du long terme



Chaire ParisTech Modélisation prospective
au service du développement durable

Naissance d'une modélisation du long terme: du Club de Rome à l'EMF et au GIEC

*Emergence du concept de **Problématique Mondiale** (ou Complexe de problèmes) (Ozbekhan) issu d'un monde en profonde mutation technologique*

- 1 problème d'échelle globale
- 2 domaines variés: écologie, éducation, pauvreté, institutions politiques

➔ **Ambition du Club de Rome:**

Répondre aux questions émergentes par

une approche méthodologique dédiée et spécifique, issue des méthodologies systémiques du domaine militaire pour mieux comprendre les "grands problèmes de l'époque"

La modélisation systémique du Club de Rome

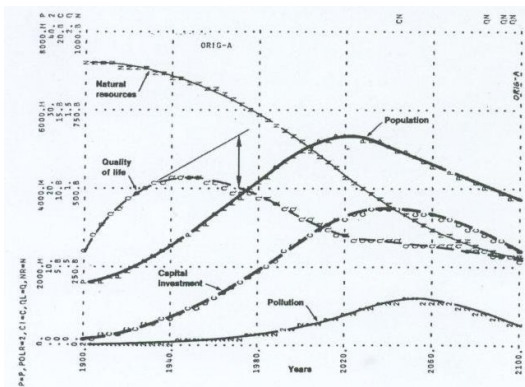
L'approche méthodologique adoptée

- s'appuie sur une équipe essentiellement américaine issue de *la dynamique des systèmes et du management des sciences* (Jay Forrester et Denis Meadows)
- aboutit au développement du **modèle WORLD**: il décrit l'évolution de 5 **variables d'état** (population, qualité de la vie, investissement, ressources naturelles, pollution) régies par des EDO:

Première tentative de modélisation mathématique pour évaluer les effets de la croissance sur le long terme au niveau mondial

Le modèle WORLD : vision issue de la dynamique des systèmes

- Une tendance “Overshoot and Collapse”: robuste aux CI sur les ressources naturelles, le progrès technologique, ...



Comportement dynamique du modèle WORLD 2, Source Forrester(1971)

Université TOTAL

Les faiblesses du modèle WORLD

Les principales **lacunes du modèle WORLD** relèvent de l'absence de représentation

- des *rappports internationaux*
- de *l'hétérogénéité des différentes parties du monde*
- des *mécanismes économiques*
- des *possibilités de substitutions* pour les ressources naturelles
- de *l'amélioration des processus de production*

Critique virulente (Nordhaus) de l'approche *phénoménologique* par EDO

☞ Au delà des divergences,

L'émergence d'une modélisation pour le long terme

convergence de plusieurs courants issus d'un réseau d'économistes et de mathématiciens fameux pour élaborer

le socle d'une modélisation prospective dédiée aux questions de long terme

A la fois

- pour répondre aux conclusions du Club de Rome
 - ☞ EMF (Energy Modelling Forum) créé à Stanford en 1976
- puis pour faire face à la première crise pétrolière en 1973
 - ☞ ETSAP (Energy Technology System Analysis Programme)
- aujourd'hui pour envisager la question climatique
 - ☞ GIEC groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

Le cadre théorique des modèles prospectifs

La question qui fait débat dans les années 1930 est

☞ *la reconstruction de la vie économique pour un horizon infini*

Elle suscite le développement d'approches fondées sur un
concept d'optimalité

- 1 **les modèles de croissance optimale**
- 2 **l'analyse d'activité**

Le modèle de croissance à horizon infini

Il est développé par **Ramsey** (1927) pour répondre à la question

☞ *“How much of its income should a nation save ?”*

Le Planificateur doit décider de **la consommation** de l'agent moyen pour un objectif socialement optimal.

Le problème de contrôle optimal de Ramsey

$$\max_{c(t)_{t \in [0, +\infty[}} U_0 = \int_0^{+\infty} u(c(t)) e^{-\rho t} dt$$

sous contraintes

$$\begin{cases} \dot{k}(t) = f(k(t)) - nk(t) - c(t) \\ k(0) = k_0, \quad k(t) \geq 0, \forall t \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

*Compte tenu des hypothèses faites sur la fonction d'utilité et sur la fonction de production homogénéisée, on peut montrer qu'il existe une unique stratégie (commande/trajectoire/sentier de croissance) optimale qui peut être exhibée grâce au **principe du Maximum de Pontriaguine***

Synthèse des principes fondateurs de Ramsey

☞ Les ingrédients du Modèle de Ramsey

les agents obéissent à un principe unique de rationalité figuré par la recherche d'un optimum intertemporel

- 1 Anticipation **parfaite**: qui permet d'intégrer les comportements
- 2 La trajectoire optimale est déterminée par l'extremum d'une fonction **intertemporelle** (aspect dynamique résolu en statique) représentant l'utilité des agents économiques.

Le modèle DICE de Nordhaus et les modèles macro-économiques dérivent de cette approche, reprise également par Koopmans (1965).

Le formalisme de l'analyse d'activité

von Neumann (1930) puis **Sraffa** utilisent

☞ *pour une reconstruction de l'univers économique*

Le formalisme de l'analyse d'activité qui

- décrit des processus qui **consomment** ou **produisent** des biens
- généralise la forme de Léontief utilisée pour la comptabilité nationale.

Le planificateur propose à partir de cette formalisation les **prix d'équilibre des biens et les quantités échangées.**

Allocation d'activité

L'objectif visé

établir le programme de production x_1, \dots, x_n de façon à maximiser le profit total, compte tenu des contraintes de limitation des facteurs de production et de satisfaction de la demande.

Ce programme s'écrit sous la forme du (PL)

$$\max_{x_j} z = \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad i = 1, \dots, m \quad x_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n$$
$$\sum_{i,j} a_{ij} x_j \geq D$$

Synthèse des principes fondateurs de von Neumann-Sraffa

☞ Les ingrédients de von Neumann et Sraffa

“A model of general equilibrium” von Neumann (1937) révolutionne l'économie mathématique en introduisant

- 1 un modèle de croissance à **horizon infini**
- 2 un schéma descriptif basé sur une **représentation atomistique** de la production via l'analyse d'activités : tout ce qui est consommé doit avoir été produit (généralisation de la forme carrée de Léontieff)
- 3 la preuve de l'**existence d'équilibre** utilise des techniques mathématiques paradigmatiques de l'optimisation : topologie, dualité, point selle, minimax, . . .

MarkAI-TIMES et les modèles bottom-up dits “ingénieur” dérivent de cette approche.

Les Modèles comme outils du débat climatique



Chaire ParisTech Modélisation prospective
au service du développement durable

Les grands déterminants de l'évolution vers les modèles de l'effet de serre

La conjugaison des préoccupations suivantes a abouti à une **modélisation des questions liées à l'effet de serre**:

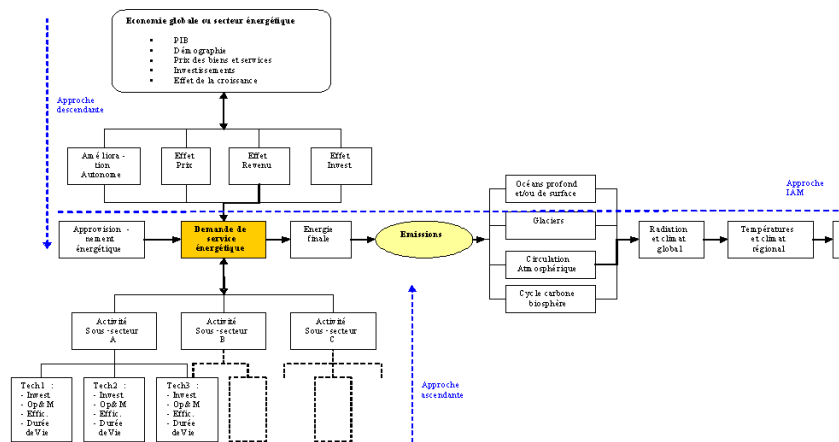
- 1 La problématique de la **gestion de grands systèmes techniques** résultant de l'application de la recherche opérationnelle au domaine militaire
- 2 La problématique du **développement** (au sens des modèles d'économies en développement)
- 3 La discussion sur **le thème de la croissance et de ses limites** (*Limits to growth*)
- 4 La **gestion des systèmes, technologies et ressources épuisables** à partir de la crise de l'énergie en 1973
- 5 La question des **pollutions globales et des gaz à effet de serre**

Les évolutions du besoin de modélisation

- 1 les conséquences de la crise de 1929, la reconstruction économique après guerre
 - ☞ *Ramsey/von Neumann/Sraffa*
- 2 les impacts de la croissance économique (1970)
 - ☞ *Modèles globaux*
- 3 la crise de l'énergie (1973) et la question du changement climatique : l'énergie devient centrale
 - ☞ *Retour des modélisations sectorielles et intégrées*

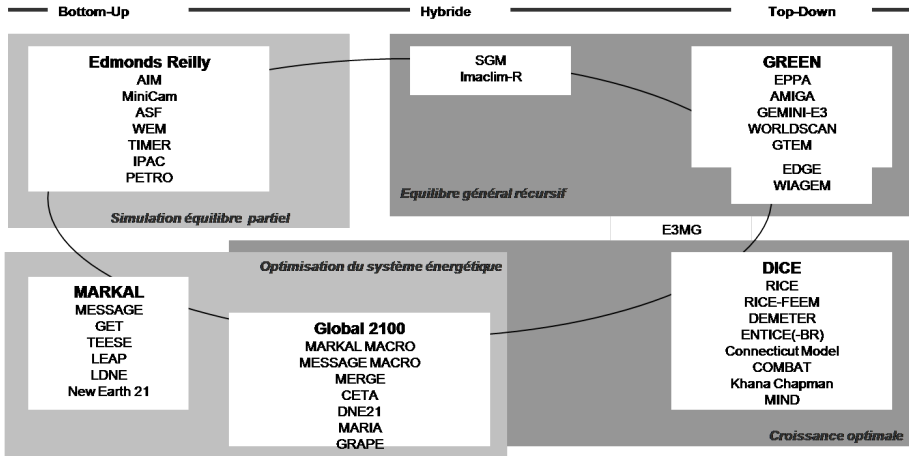
Les familles de modèles pour l'évaluation de politique

à prédominance : économique, technologique ou climatique

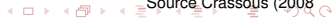


Source AIE et Parson & Fisher-Vanden & Assoumou (2005)

Classification des modèles: une autre vue



Source Crassous (2008)



Les Modèles de la Chaire MarkAI/TIMES-FR, TIAM-FR, IMACLIM-R, IMACLIM-S



Chaire ParisTech Modélisation prospective
au service du développement durable

MarkAI-TIMES un modèle bottom-up

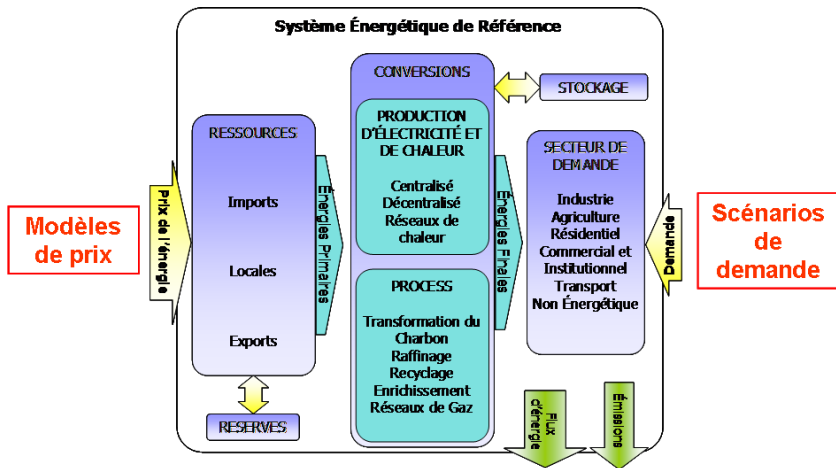
Le modèle MarkAI-TIMES

Un modèle technologique d'optimisation linéaire piloté par la demande

MarkAI-TIMES réalise une **optimisation technico-économique**

- 1 pour la **chaîne énergétique de référence** (RES):
 - de l'amont (production et offre énergétique)
 - à l'aval (secteurs économiques utilisant l'énergie finale)
- 2 pilotée par **la demande** et soumis à contraintes
- 3 sur un **horizon certain** : moyen ou long terme (20/50/100 ans)
- 4 pour un **objectif** : technique/économique/environnemental :
(coûts économiques, émissions de polluants, ...)

Le système énergétique de référence



IMACLIM est un modèle hybride

