



Des modèles de long terme: du paradigme optimal à la transition énergétique

Nadia Maïzi

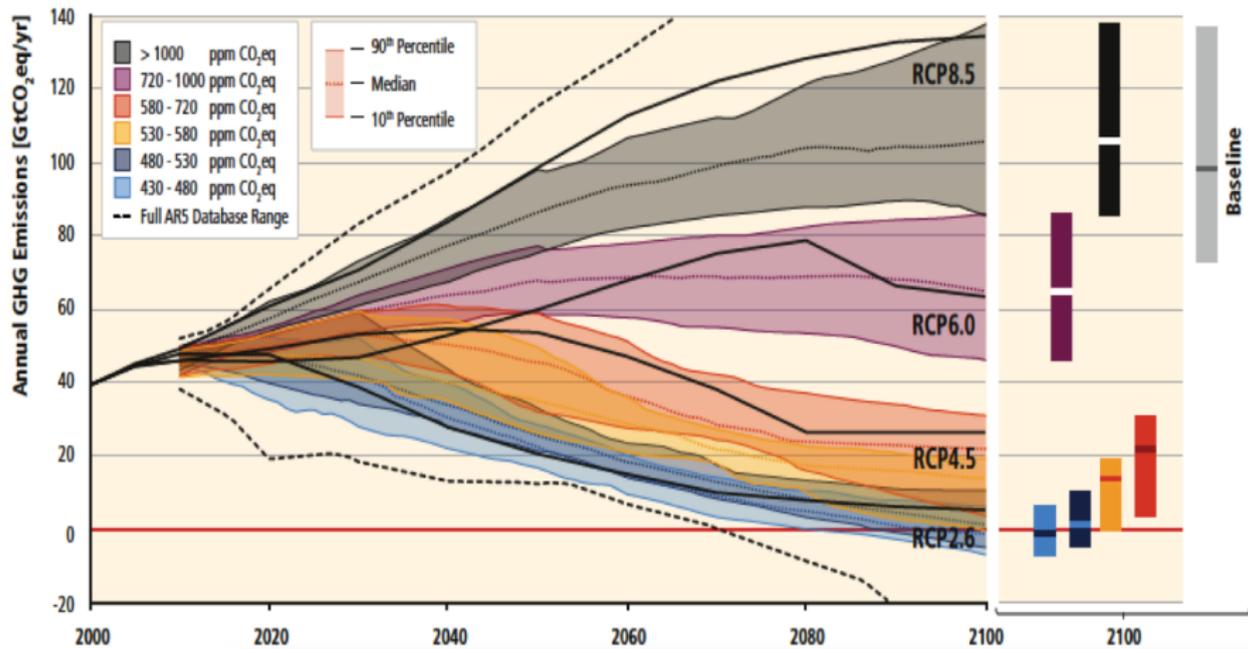
¹MINES ParisTech, PSL Research University, CMA - Centre de mathématiques appliquées, CS 10207 rue Claude Daunesse 06904 Sophia Antipolis Cedex, France

²Chaire Modélisation prospective au service du développement durable

Séminaire MINES de Nancy

Ce que nous disent les scénarios du dernier rapport du GIEC

GHG Emission Pathways 2000-2100: All AR5 Scenarios



900 scénarios: c'est beaucoup....

"There are multiple scenarios with a range of technological and behavioral options, with different characteristics and implications for sustainable development, that are consistent with different levels of mitigation. For this assessment, about 900 mitigation scenarios have been collected in a database based on published integrated models."

(IPCC, 2014: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.)

Une profusion de trajectoires qui finalement gomme ou amplifient

- 1 l'urgence et l'incertitude de la catastrophe
- 2 les réalités locales pour donner une vision globale : méthane des rizières et le CO₂ de nos transports

S. Aykut/A. Dahan (2015)

Les exercices de scénarisation du futur

➔ De la difficulté de leur interprétation sans préciser

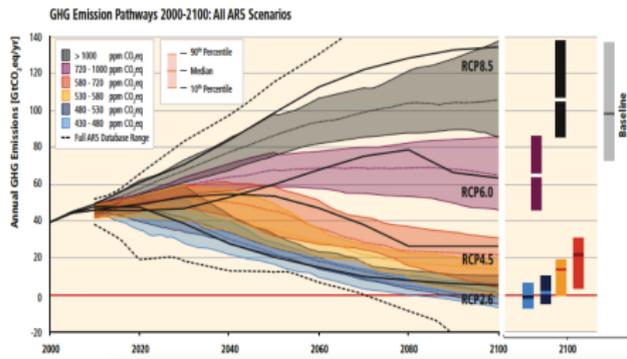
- leur positionnement par rapport au futur
- les clés du raccordement des trajectoires proposées au réel : i.e. savoir ouvrir les boites

Deux écueils contre lesquels il est indispensable de se prémunir.



Le rapport au Futur

ce que les scénarios peuvent dire du futur



Source : IPCC, 2014: Summary for Policymakers



Chaire ParisTech Modélisation prospective
au service du développement durable

Se préparer à l'action

Considérons la réflexion qui doit mener à toute action, et qui consiste à définir une stratégie pour *envisager à l'avance toutes les ramifications du possible* (Pierre Massé).

Le Joueur d'échec conçoit sa stratégie classique en

- mesurant ses possibilités
- anticipant les réactions de l'adversaire

Mais quid du Joueur qui doit s'adapter à un Jeu dont les règles **se modifient** au cours de la partie, lorsque les pièces **changent** de nombre et de nature ?



Elke Rehder: Le Joueur d'échecs.

Accélération et enchevêtrement

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.

G. Berger, 1960

- voir loin
- voir large
- analyser en profondeur
- prendre des risques
- penser à l'homme



Naissance de l'indiscipline prospective

Autour de Gaston Berger dans les années 1960, les membres du **Centre International de Prospective** perçoivent qu'**accélération** et **enchevêtrement** s'amplifient, conduisant à s'ouvrir à tout un champ de possibles, en bien, en mal, et

- qu'il faut **regarder l'Avenir en face**,
- le saisir dans sa **nature originale** et,
- par conséquent, lui **appliquer d'autres méthodes** que celles qui valent pour le présent ou le passé.

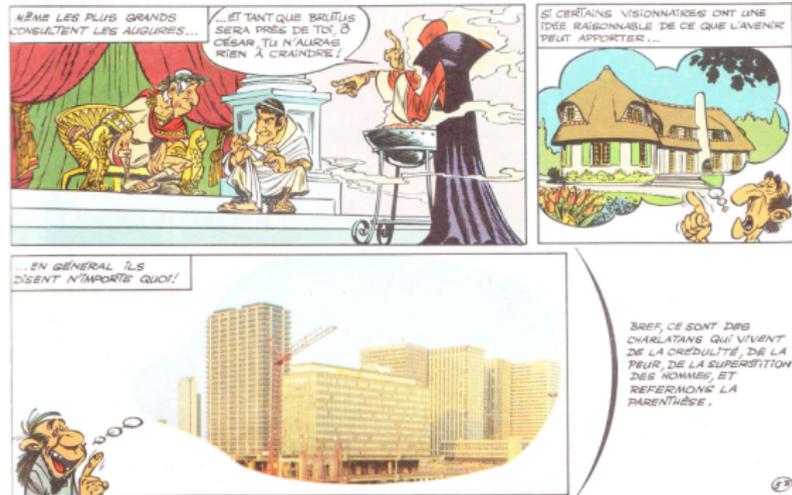
... contrairement à Paul Valéry pour qui *nous abordons l'avenir à reculons*

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

La Prévision impose le futur.

La demande de prédictions :

s'adresse aux oracles (4^{ème} millénaire av. J.-C.) puis aux approches scientifiques qui permette le calcul des trajectoires (astres, boulets, fusées, température, phénomènes météorologiques)



Uderzo, Goscinny: Le Devin.

La prévision vise à anticiper des événements probables auxquels il faudra s'adapter : Il s'agit de **pré-voir** dans l'idée de **subir** dans une attitude fataliste

Construire l'Avenir

➡ **Pour la prospective** : le futur est une sorte d'observatoire d'où elle peut jeter des regards sur des chemins qui conduisent les hommes, la société, jusqu'à lui.

- La prospective cherche à fixer des objectifs possibles auxquels il faudra parvenir : l'avenir non pas comme **"une chose déjà décidée, et qui petit à petit, se découvrirait à nous, mais comme une chose à faire"** G. Berger
- Elle opère un **divorce avec la futurologie**
- L'homme a vocation d'intervenir dans l'événement au lieu de le subir : c'est un **homme d'action** qui refuse la fatalité.

Les horizons de la Prévision et de la Prospective

La Prospective est tout particulièrement l'étude de **l'avenir lointain**.

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)

Des disciplines prospectives pour construire l'Avenir

Élément de la réflexion, du débat, de la prise de décision afin :

- de **parer** l'imprévu à travers une **pluralité d'avenirs imaginés**
- de **fabriquer une prothèse** pour le **décideur aveugle** désireux d'une **aventure calculée**

La démarche

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

L'objet

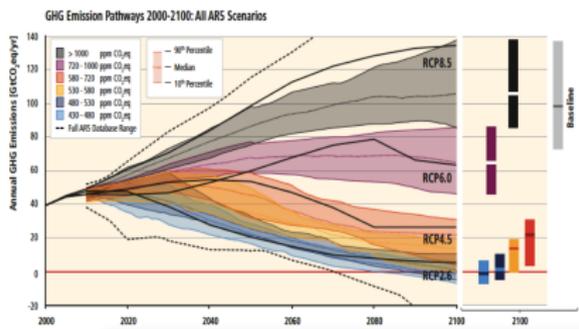
Dans le but d'examiner les
évolutions possibles
en fonction
des décisions prises, des
actions réalisées.

La prospective regarde en avant.

Le regard est pour elle le premier temps de l'action

naissance des modèles du Long terme

Décrypter et raccorder les scénarios au réel



Source : IPCC, 2014: Summary for Policymakers



Le Club de Rome

Un groupe de réflexion créé à l'initiative d'Aurélio Peccei (ex FIAT) en Septembre 1968

questionne la vision angélique du progrès = vecteur de bien être + positif pour l'environnement

Un groupe multidisciplinaire

- *Aurélio Peccei* : industriel italien (FIAT), impliqué dans le développement du tiers monde
- *Alexander King* : directeur scientifique à l'OCDE
- *Erich Jantsch* : consultant OCDE, prévision technologique
- *Hasan Ozbekhan* : cybernéticien
- *Jay Forrester* : contrôle et analyse et gestion dynamique des systèmes

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

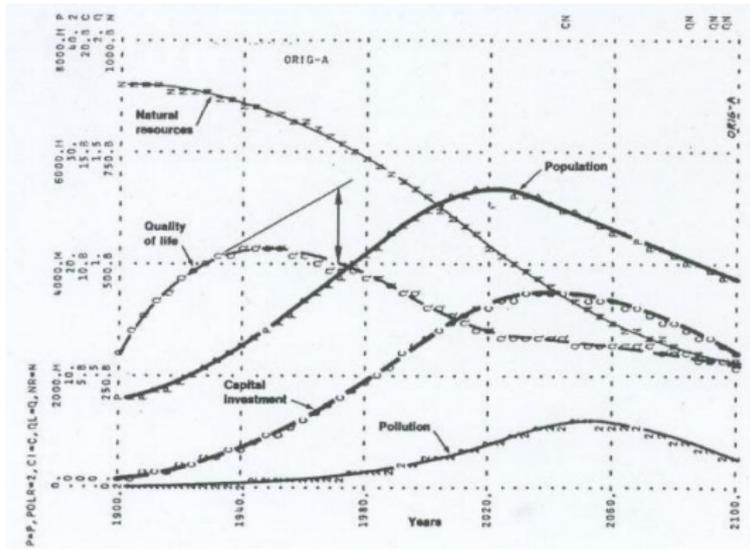
L'approche méthodologique adoptée

- 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)

Emergence d'une modélisation pour le long terme

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

Au delà des divergences, convergence de plusieurs courants pour élaborer le socle d'une modélisation prospective dédiée aux questions de long terme

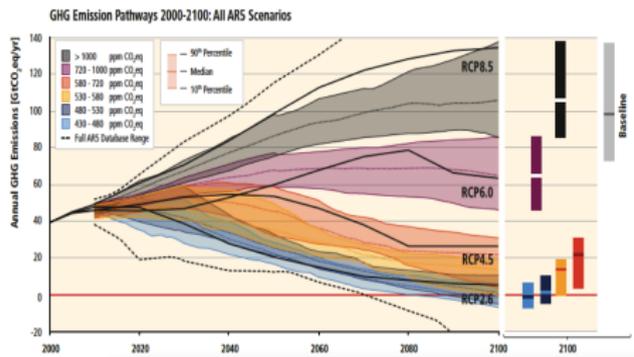
à la fois

- pour répondre aux conclusions du Club de Rome
- puis pour faire face à la première crise pétrolière en 1973
- aujourd'hui pour envisager la question climatique

et se prolongeant jusqu'à aujourd'hui à travers **EMF, GIEC, ETSAP**.

décrypter les modèles du long terme

Une multitude de modèles



Source : IPCC, 2014: Summary for Policymakers



Chaire ParisTech Modélisation prospective
au service du développement durable

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'activités**

Des principes fondateurs des modèles macro-économiques

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

Le problème de Ramsey

La recherche du bien être social se formalise en un problème de commande optimale:

$$\max_{c(t)_{t \in [0, +\infty[}} \mathcal{U}_0 = \int_0^{+\infty} u(c(t)) e^{-\rho t} dt$$

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***

De Ramsey à DICE Dynamic Integrated model of Climate and the Economy

Les critiques du modèle WORLD faites par Nordhaus pointaient les lacunes suivantes:

- Pas de point de vue économique
- Pas de bouclage entre Climat et Economie
- Approche purement phénoménologique (rétrospective)
- Pas d'éléments sur la dynamique (le chemin optimal), une approche *steady state*

DICE est un modèle de croissance optimale à la Ramsey qui intègre

- 1 un **modèle climatique** avec une **interaction** entre le climat et l'économie
- 2 estime le chemin optimal à la fois pour le **capital accumulé** et les **réductions de GES**

Rolling the "DICE": An optimal transition path for controlling greenhouse gases, William D. Nordhaus, November

Des principes fondateurs des modèles technico-économiques

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.

☞ **MarkAI-TIMES** et les modèles bottom-up dits "ingénieur" dérivent de cette approche.

TIMES The Integrated MarkAI (market allocation)-EFOM System

Le formalisme de l'analyse d'activité

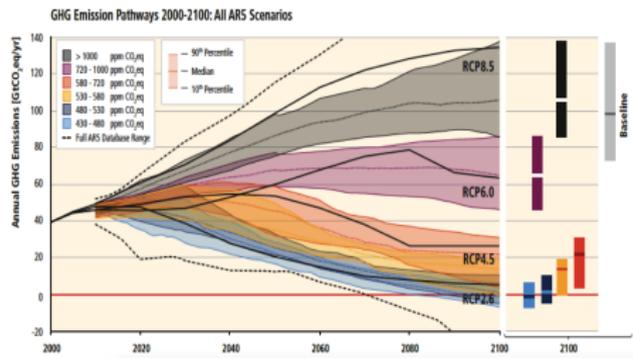
Le planificateur établit un programme via une formulation en **allocation optimale**

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

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

raccorder les scénarios au réel

Ouvrir les boîtes noires



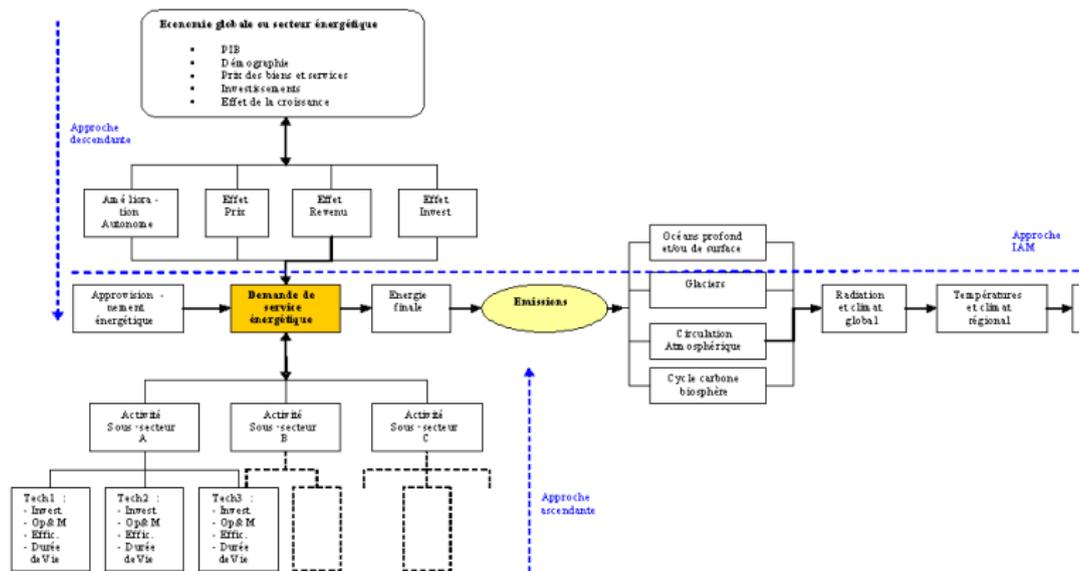
Source : IPCC, 2014: Summary for Policymakers



Chaire ParisTech Modélisation prospective
au service du développement durable

900 scénarios qui devraient se lire

- selon la prédominance économique, technologique ou climatique des modèles/approches qui les ont générés



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

Ouvrir la "black-box" et aller plus loin

Choisir une prédominance **technologique** :

 **TIMES** (The Integrated MarkAI (market allocation)-EFOM System)

- 1 modèle **ouvert**
- 2 développé dans le cadre de l'**ETSAP** :
Energy Technology Systems Analysis Programme de l'AIE (depuis 1980)
- 3 représentation technologique très **détaillée**
tant pour les technologies existantes que pour les technologies du futur

- Comprendre et Maitriser le modèle ;
- Intégrer ses limites (la prothèse) ;
- Chercher à le raffiner en réconciliant les échelles de la complexité (spatiales P. Hugues, S. Postic, temporelles V. Krakowski, J. Guttiriez, sociétales F. Briens, T. Le Gallic, E. Stolyareva).

Compétitions, substitutions et cohérences préservées

lorsque l'on parle d'énergie

TIMES

Un modèle technologique d'optimisation linéaire, ouvert, développé dans le cadre de l' ETSAP (AIE)

- piloté par la demande
- sur un horizon certain : moyen ou long terme (50/100 ans)
- dont l'objectif est la minimisation du coût total actualisé du système énergétique

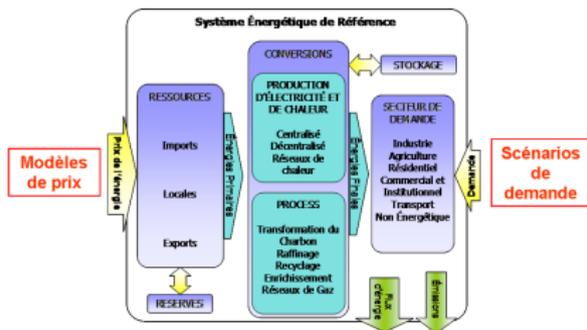


Figure: système énergétique de référence de TIMES

Paradigme optimal

$$\min_{x \in X} f(x)$$

x variable de décision

X espace de contraintes

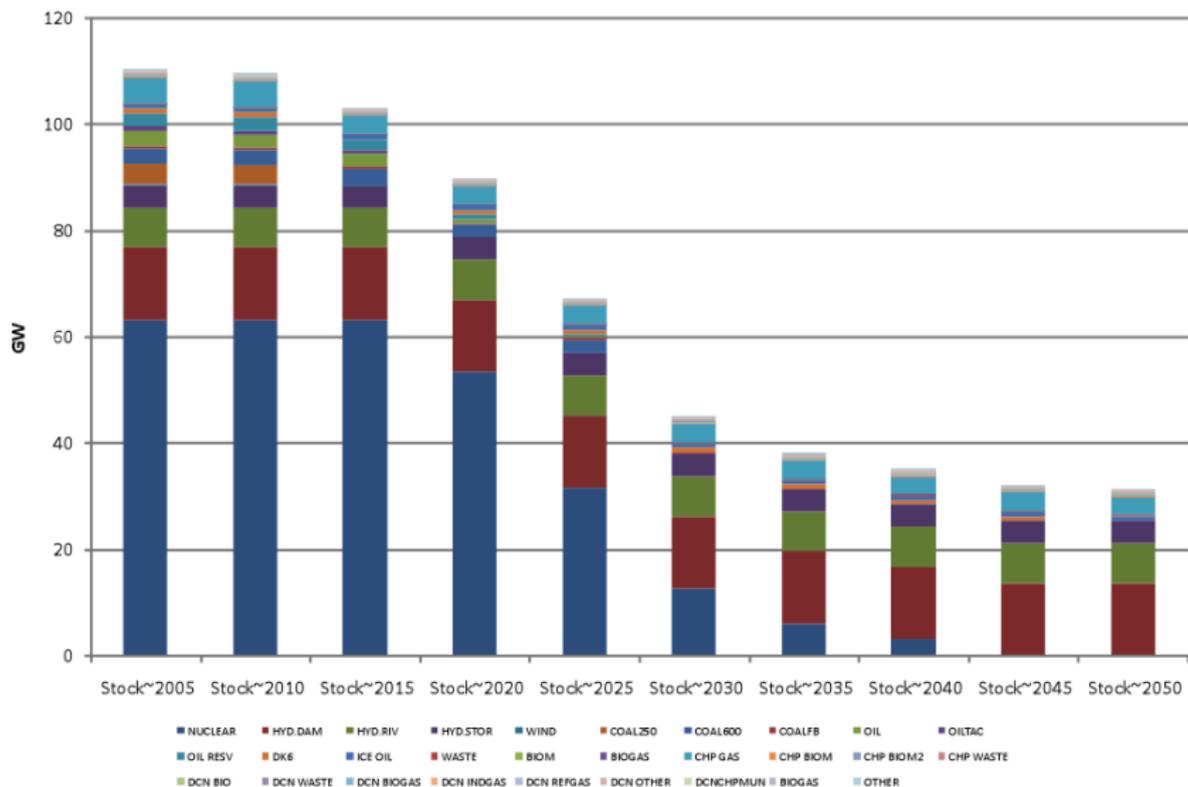
f objectif

questions pour la transition énergétique



Chaire ParisTech Modélisation prospective
au service du développement durable

la question du devenir des centrales nucléaires en France



Sortie du nucléaire avec une taxe

[N. Maïzi, E. Assoumou, Future prospects for nuclear power in France, Applied Energy (2014), pp. 849-859]

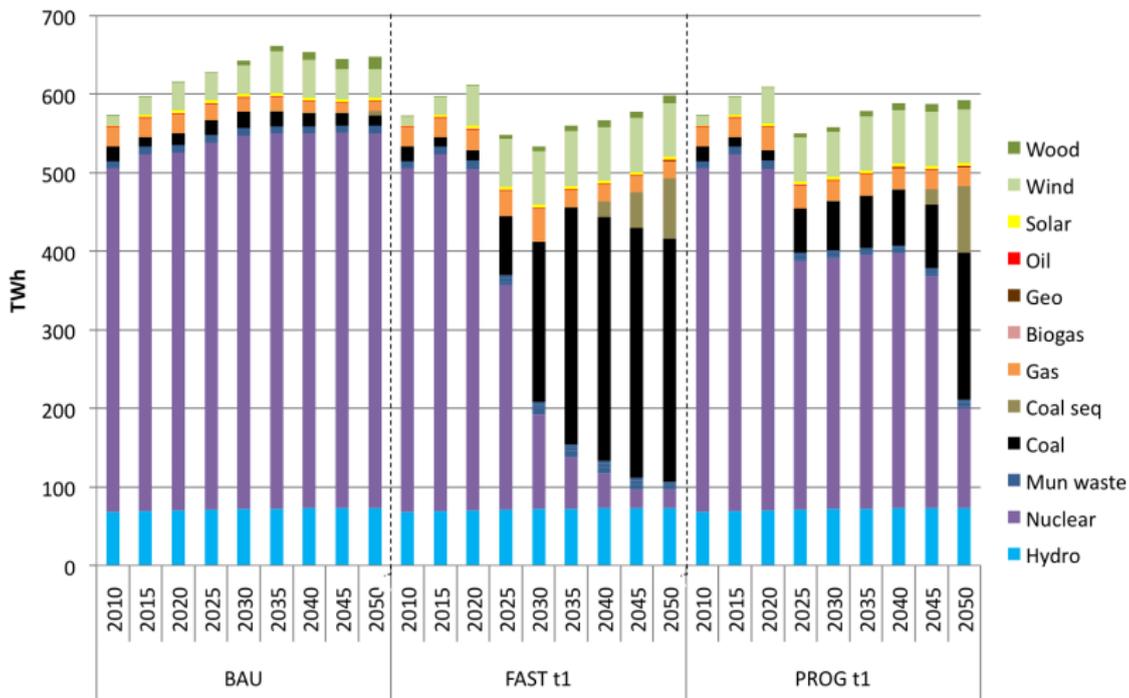


Figure: Mix de production d'électricité (taxe CO₂)

Les exportations nettes françaises diminuent

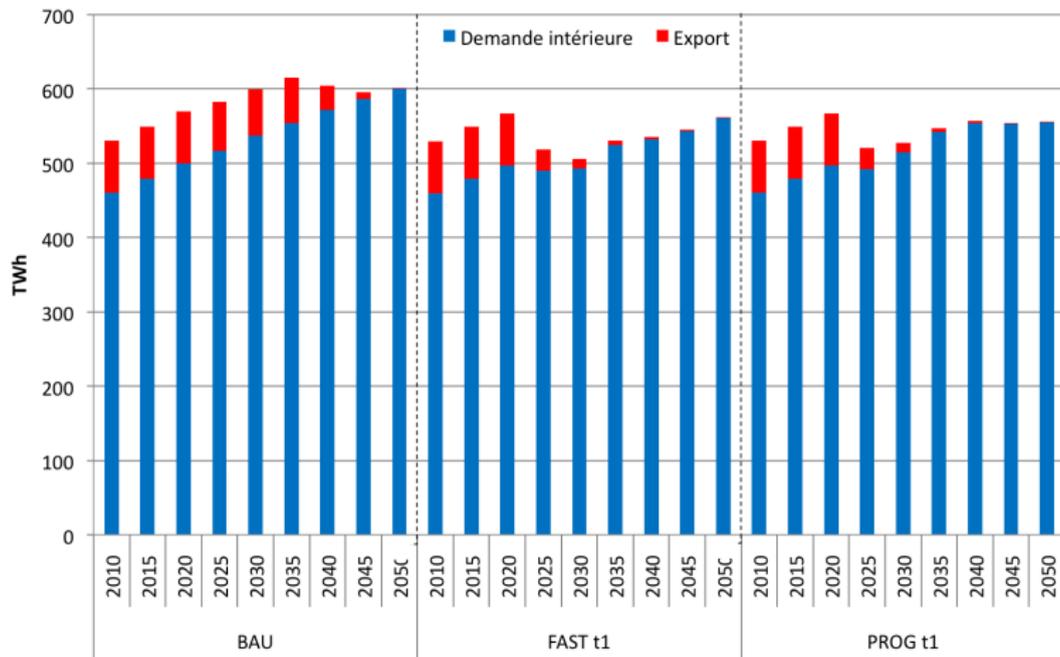


Figure: Export/Demande domestique (taxe CO₂)

Analyse de sensibilité

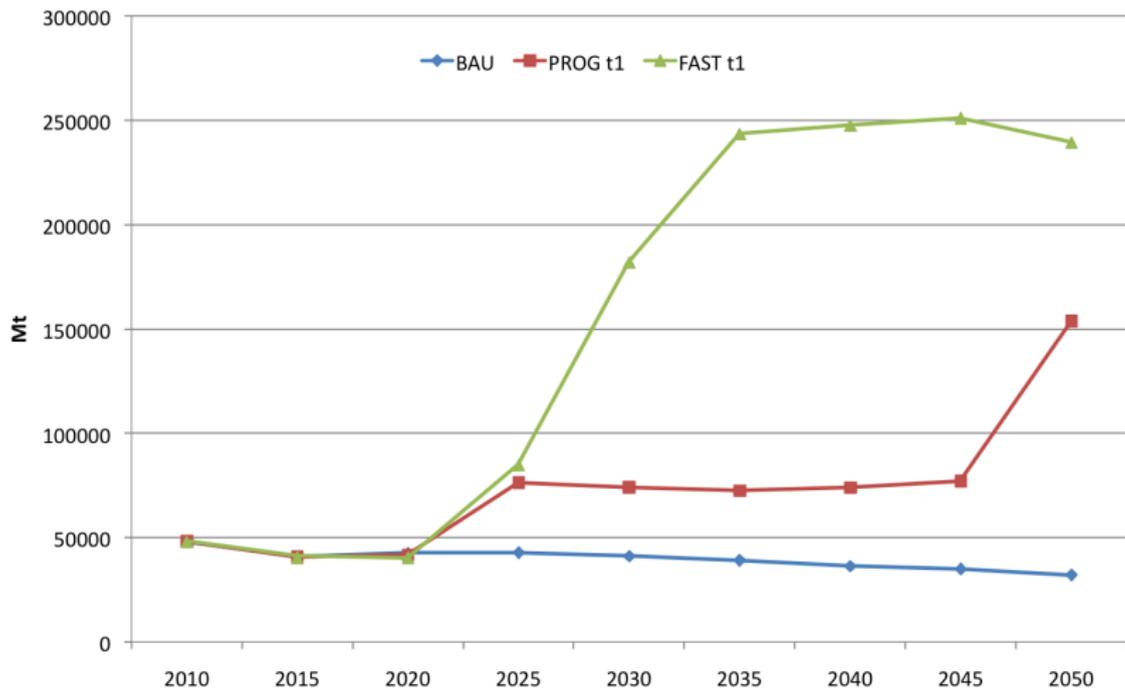
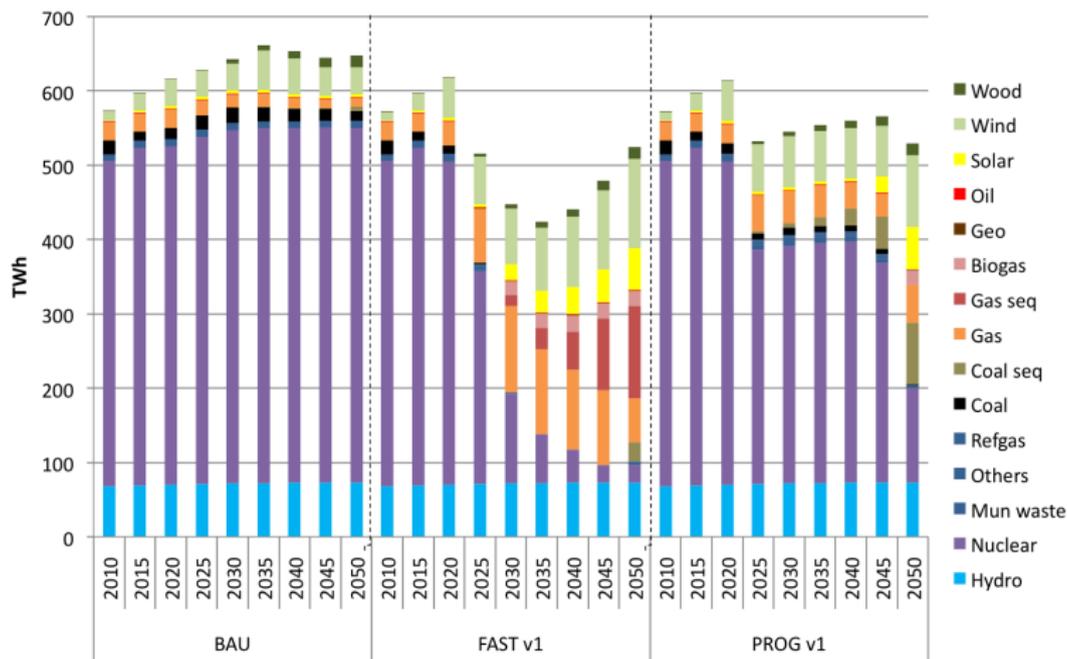


Figure: Volume d'émissions de CO₂ du secteur électrique

Sortie du nucléaire contraint par taxe + quantités

Figure: Mix de production d'électricité (taxe CO₂ + volume)

Les investissements pour une sortie rapide

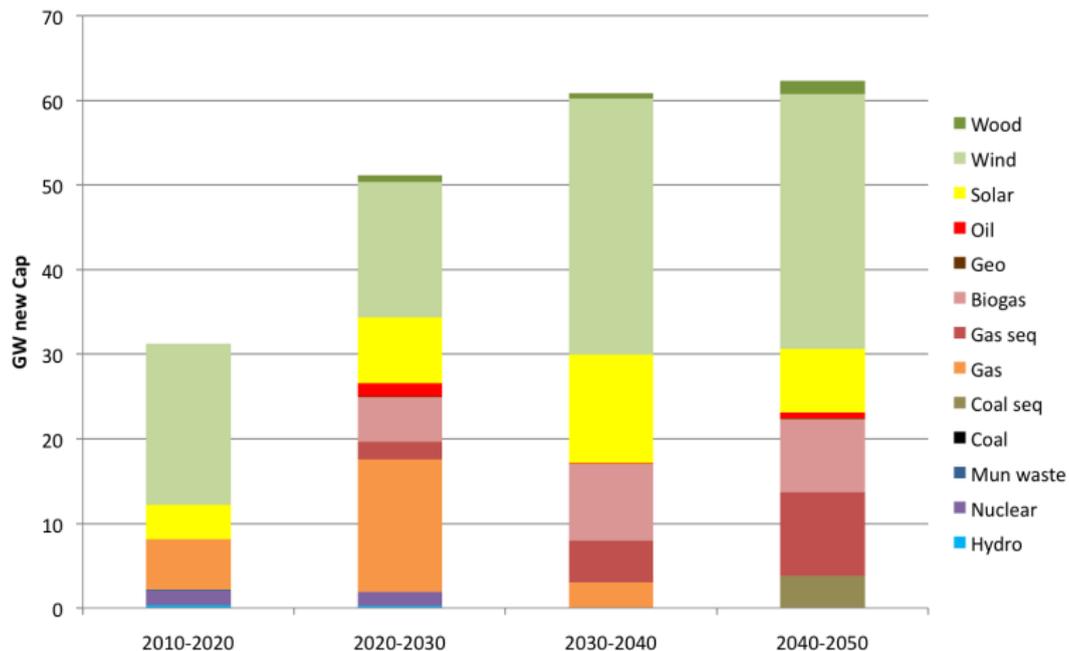


Figure: Nouvelles capacités installées FASTv1 (durée de vie de 40a, taxe + volume)

Faire de la prospective

en s'appuyant sur une méthodologie

- qui permet d'évaluer la qualité de service à l'utilisateur
- qui donne des indications sur les coûts
- qui intègre les externalités
- qui évalue les compétitions sectorielles

et produit des éléments d'éclairage pour bâtir **les trajectoires bas carbone** compatibles avec l'enjeu climatique.

c'est la condition de l'élaboration d'une transition énergétique intelligente

Travaillons donc à bien penser, c'est le principe de la politique. Pascal

<http://www.modelisation-prospective.org/>



Chaire ParisTech Modélisation prospective
au service du développement durable