



**HAL**  
open science

# Produire des scénarios par centaines : Comment les démarches statistiques renouvellent les approches prospectives

Céline Guivarch, J. Rozenberg

► **To cite this version:**

Céline Guivarch, J. Rozenberg. Produire des scénarios par centaines : Comment les démarches statistiques renouvellent les approches prospectives. *Futuribles*, 2014, 398, pp.49-56. hal-01018477

**HAL Id: hal-01018477**

**<https://hal.science/hal-01018477>**

Submitted on 17 Apr 2018

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

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

# Produire des scénarios par centaines : Comment les démarches statistiques renouvellent les approches prospectives

Céline Guivarch<sup>1\*</sup> et Julie Rozenberg<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ecole des Ponts ParisTech, CIRED, 45bis avenue de la Belle Gabrielle, 94340 Nogent-sur-Marne

<sup>2</sup> CIRED, 45bis avenue de la Belle Gabrielle, 94340 Nogent-sur-Marne

\*guivarch@centre-cired.fr<sup>1</sup>

Ce texte est un post-print de l'article : Guivarch, C. et Rozenberg, J. 2014. 'Produire des scénarios par centaines. Comment les démarches statistiques renouvellent les approches prospectives.' *Futuribles* 398, 49-56.

*« Le futur le plus probable  
n'existe pas »*

(Herman Kahn)

## 1. Introduction

Construire une centrale à gaz, un champ d'éoliennes ou un barrage hydroélectrique pour fournir de l'électricité à une région ? Protéger ou non une zone par des digues contre un risque d'inondation ? Quelle stratégie pour répondre aux besoins en eau futurs d'une région ? Quelle(s) essence(s) planter dans telle ou telle forêt ? Toutes ces décisions sont lourdes de conséquences, et pourtant elles doivent être prises dans un contexte d'incertitudes sur de nombreux plans. Prendre une « bonne » décision requiert à la fois une vision qualitative de l'éventail des futurs possibles, et une traduction quantitative des trajectoires qui en découlent.

Dans l'approche classique, après avoir identifié les facteurs-clés de la variété des futurs possibles, on retient quelques combinaisons d'hypothèses contrastées pour ces facteurs qui, traduites en grandeurs d'entrée d'un modèle mathématique, produisent les scénarios quantitatifs pour l'étude. L'hypothèse implicite est qu'un pavage correct du champ des incertitudes à l'entrée, grâce à ces jeux d'hypothèses contrastés, produira un éventail de scénarios représentatif du champ des possibles en sortie.

Mais la sophistication croissante des modèles, traduisant toujours plus finement la complexité des phénomènes étudiés, rend de plus en plus fragile cette hypothèse de travail. Les interactions entre variables, non linéarités ou de boucles de rétroactions peuvent conduire à des trajectoires totalement contre-intuitives, et n'autorisent plus à croire que la représentativité des hypothèses d'entrée conduit nécessairement à la représentativité des scénarios en sortie.

---

<sup>1</sup> Les auteurs remercient Bernard David pour ses commentaires sur des versions antérieures de ce texte. Cette version a grandement bénéficié de ses suggestions.

Le travail présenté ici s'attaque précisément à cette problématique, en proposant une méthode qui contourne la difficulté : plutôt que de sélectionner a priori quelques jeux d'hypothèses pour construire un petit nombre de scénarios d'étude, il s'agit de faire tourner les modèles des centaines ou milliers de fois pour explorer un large ensemble de futurs plausibles. Les choix se feront alors dans l'espace-cible (celui des scénarios) plutôt que l'espace-source (celui des hypothèses).

Cet article propose d'explorer les perspectives ouvertes par cette nouvelle approche, et de l'illustrer à partir d'une base de données de scénarios technico-socio-économiques globaux développée au CIRED avec le modèle Imaclim-R, pour l'étude de l'économie du changement climatique.

## **2. Construire des bases de données de scénarios pour explorer l'espace des incertitudes**

### ***La méthode***

Comme dans tout exercice de prospective quantitative, la démarche débute par la structuration du problème, dans laquelle sont définis l'objet de la décision à l'étude, la question qui se pose, les enjeux et le contexte, les objectifs, ainsi que les « déterminants » ou incertitudes clés à considérer. Ceci conduit à choisir, ou développer, un ou plusieurs modèles pertinents pour étudier la question à l'étude, c'est-à-dire qui représentent des mécanismes reliant les déterminants identifiés à la question qui se pose. Les déterminants identifiés précédemment sont ensuite traduits en paramètres du/des modèle(s).

Puis on construit l'objet de l'étude, à savoir la base de données de scénarios. La prise en compte de toutes les combinaisons possibles de valeurs prises par chaque paramètre d'entrée, ou groupe de paramètres, génère un large ensemble de scénarios quantitatifs, souvent quelques centaines ou milliers, qui couvrent l'espace des incertitudes identifiées comme, a priori, importantes pour l'objet à l'étude.

### ***Les perspectives ouvertes***

Travailler avec un large ensemble de scénarios quantitatifs ouvre un certain nombre de perspectives nouvelles, détaillées ou illustrées ci-dessous : évaluer la sensibilité/robustesse des résultats aux incertitudes, identifier des comportements émergents sur l'ensemble des scénarios, sélectionner a posteriori un petit nombre de scénarios « pertinents » pour une étude détaillée.

Lorsqu'on ne dispose que de quelques scénarios, il n'est pas possible de savoir si les évaluations chiffrées et mécanismes mis en évidence sont robustes à une variation des paramètres clés ou si l'on se trouve dans un cas particulier. Avec une base de données de scénarios, les quantifications sont associées à leurs marges d'erreur dues aux incertitudes considérées. Cela permet de discriminer les résultats robustes de ceux qui sont sensibles aux paramètres incertains.

Par ailleurs, disposer d'une base de données de scénarios permet d'étudier la distribution des résultats, et d'appliquer des raisonnements « probabilistes », dès lors que l'on fait l'hypothèse de distributions de probabilités pour les valeurs des paramètres ou que l'on attribue des probabilités aux scénarios construits.

Il est également possible d'analyser l'ensemble des scénarios pour identifier des comportements émergents. Par exemple, étudier les corrélations entre différents indicateurs de résultats permet d'éclairer des décisions multicritères, et de mettre en évidence les lieux de compromis ou de synergies.

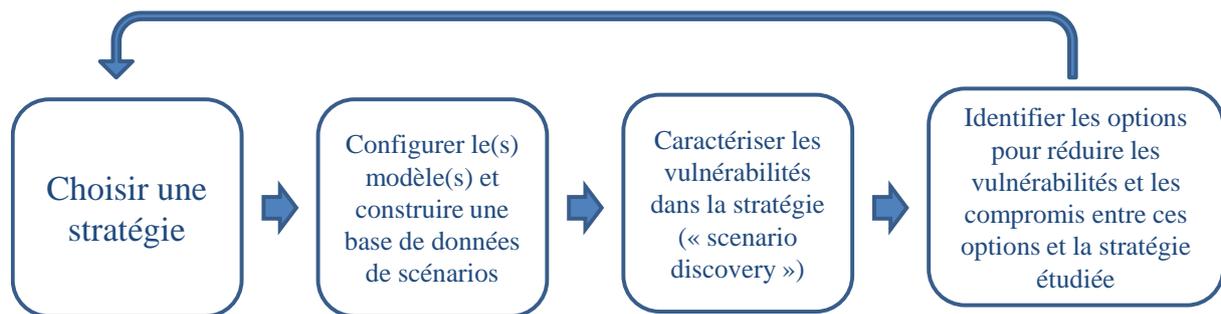
Pour aller plus loin, on peut mettre en évidence les « conditions » de ces compromis ou synergies. Pour cela des méthodes de « datamining » sont utilisées pour faire ressortir les principaux paramètres

déterminants d'un type de résultat, i.e. la conjonction de facteurs d'entrée amenant les résultats dans une certaine zone de l'espace-cible.

### ***La décision robuste***

Un type d'application particulière de cette méthode consiste à mettre en évidence les conjonctions de facteurs qui font qu'une politique, mesure ou stratégie donnée a un coût élevé, ou n'atteint pas ses objectifs. Ce type d'application s'apparente aux méthodes de « décision robuste » (Lempert et al., 2013) qui s'attachent à découvrir et caractériser les cas dans lesquels une stratégie envisagée n'est pas efficace, afin de concevoir une stratégie plus robuste à l'incertitude (figure 1).

Dans ce cas, des modèles sont utilisés pour générer une base de données de scénarios dans laquelle chaque cas représente la performance d'une stratégie proposée dans un monde futur plausible. Des visualisations et analyses statistiques de cette base de données permettent d'identifier les scénarios qui mettent en lumière les vulnérabilités de la stratégie étudiée. On propose ainsi aux décideurs de nouvelles façons d'aborder le problème, et d'évaluer si ces nouvelles stratégies méritent d'être adoptées. Le processus continue par itérations jusqu'à l'identification d'une stratégie jugée suffisamment « robuste » aux incertitudes, c'est-à-dire qui a de bons résultats relativement aux stratégies alternatives dans un vaste ensemble de futurs plausibles.



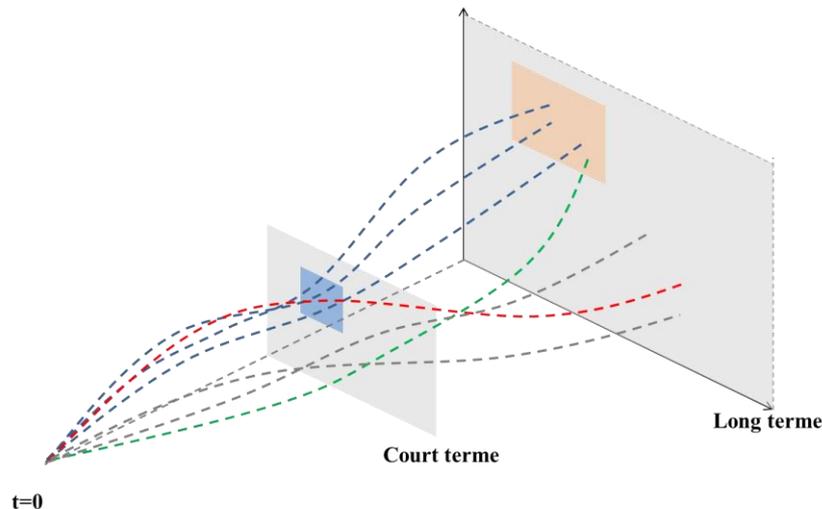
**Figure 1 : Etapes dans le processus de décision robuste**  
(adapté de Lempert et al., 2013).

Ce type de processus a été appliqué dans des contextes divers. Par exemple, il a été utilisé pour rendre les plans de gestion de l'eau à long-terme de l'Inland Empire Utilities Agency de Californie du Sud robustes à l'incertitude climatique (Lempert et Groves, 2010). Il a aussi été appliqué pour alimenter le débat au Congrès américain en évaluant dans quelles conditions la prolongation du système d'assurance fédéral contre le risque terroriste (Terrorism Risk Insurance Act) serait profitable pour les contribuables (Dixon et al., 2007).

### ***Les fenêtres de passage favorables***

L'ensemble de scénarios peut également être analysé de façon dynamique, afin de relier le court-terme et le plus long-terme (figure 2). Une approche dynamique permet en effet de répondre à des questions du type « Où dois-je me trouver à court-terme pour être bien placé pour atteindre tel ou tel objectif de long-terme ? ». Etant donné la diversité des trajectoires qu'il est possible de générer quand on s'intéresse au long terme, une telle question n'est pertinente que pour un large ensemble de scénarios.

Cette approche met en évidence des points de passages (nécessaires ou suffisants) afin d'atteindre une situation de long-terme désirable, ou à l'inverse des risques de bifurcations ou une diversité de trajectoires menant à un état final donné. Ce type d'analyse donne des informations pour concevoir des stratégies flexibles, adaptatives dans le temps, ainsi que des signaux d'alerte précoces indiquant que l'on est sur une trajectoire de court-terme qui risque de ne pas aboutir à l'objectif de long-terme désiré.



**Figure 2: Les fenêtres de passage favorables**

*L'analyse dynamique d'un ensemble de scénarios permet d'identifier des fenêtres de passage à court terme favorables à l'atteinte de la cible de long terme.*

### ***Le choix de scénarios pertinents***

Il y a quand même des cas où on a besoin de sélectionner un petit nombre de scénarios, pour communiquer ou pour harmoniser des études qui vont s'appuyer sur ces scénarios. Dans ces cas, l'utilisation d'une base de données de scénarios permet de sélectionner ce petit nombre de scénarios d'une façon pertinente. Par pertinente, entendons moins arbitraire que la pratique de « logique intuitive » consistant à définir quelques histoires plausibles, et apparemment contrastées, des évolutions futures de l'objet d'étude.

En effet, la limite de ce type de « logique intuitive » est que l'espace des incertitudes est exploré de façon ad hoc, négligeant donc de nombreuses incertitudes potentiellement importantes. L'utilisation d'une base de données de scénarios propose une alternative, ou plutôt un complément, à ce type d'approche. Si l'objectif est de sélectionner un petit nombre de scénarios aussi contrastés que possible afin de couvrir l'espace des incertitudes, il s'agit alors de définir les « axes » selon lesquels on souhaite contraster les scénarios, et utiliser des méthodes de « datamining » pour trouver les déterminants qui conduisent les scénarios à se situer dans tel ou tel espace défini par ces axes.

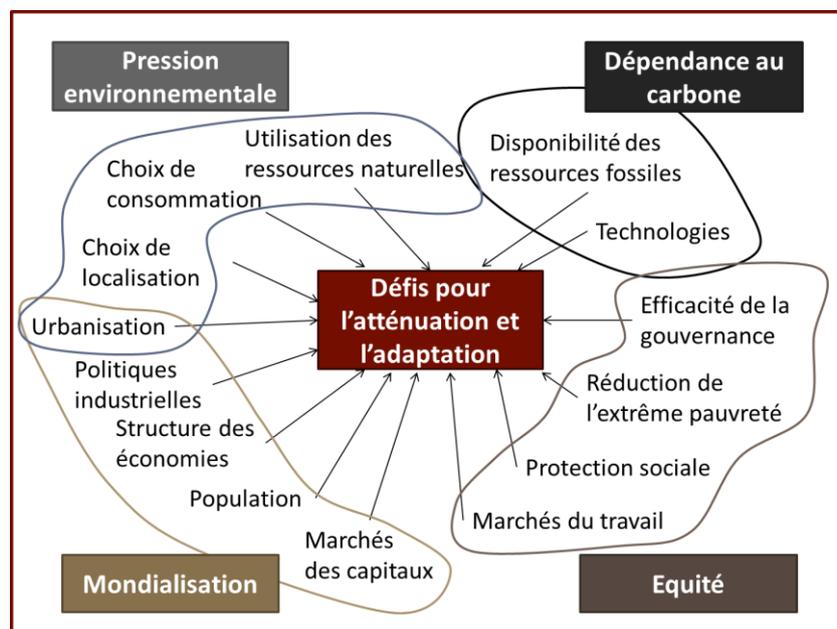
### **3. Illustrations avec une base de données de scénarios pour l'étude de l'économie du changement climatique**

L'application concrète présentée ici illustre quelques-unes des possibilités ouvertes par une démarche s'appuyant sur un grand nombre de scénarios, à partir d'une base de données de scénarios technico-socio-économiques globaux développée au CIRED avec le modèle Imaclim-R, pour l'étude de l'économie du changement climatique.

La prise en compte des incertitudes est particulièrement importante et délicate pour la question du changement climatique, puisque les éléments incertains sont nombreux et que l'on se trouve face à des « incertitudes radicales », définies ici comme une situation dans laquelle les décideurs ne connaissent pas ou ne sont pas d'accord sur la structure du modèle reliant actions et conséquences et sur les distributions de probabilités des paramètres clés du/des modèle(s). Par ailleurs, l'objet à étudier, à savoir les interactions économie-systèmes techniques-sociétés-climat, comporte de nombreuses rétroactions et non-linéarités. Ainsi, on se trouve bien dans un cas où il est pertinent d'utiliser l'approche proposée ci-dessus.

### *Construction de la base de données de scénarios*

Nous avons identifié quatre grandes catégories de déterminants, qui sont représentées figure 3. Par exemple, l'équité est importante pour la capacité future à s'adapter au changement climatique car les populations les plus pauvres sont les plus vulnérables au changement climatique. La dépendance au carbone, quant à elle, sera surtout importante pour la capacité du monde à réduire les émissions de gaz à effet de serre à un coût raisonnable.



**Figure 3 : Les déterminants du changement climatique**

*Pour construire des scénarios socio-économiques pour la recherche sur le changement climatique, de multiples déterminants potentiels ont été identifiés et regroupés en quatre grandes catégories*

Nous identifions ensuite les paramètres du modèle Imaclim-R correspondant aux différentes catégories, et construisons deux ou trois alternatives contrastées pour chaque paramètre. Certains

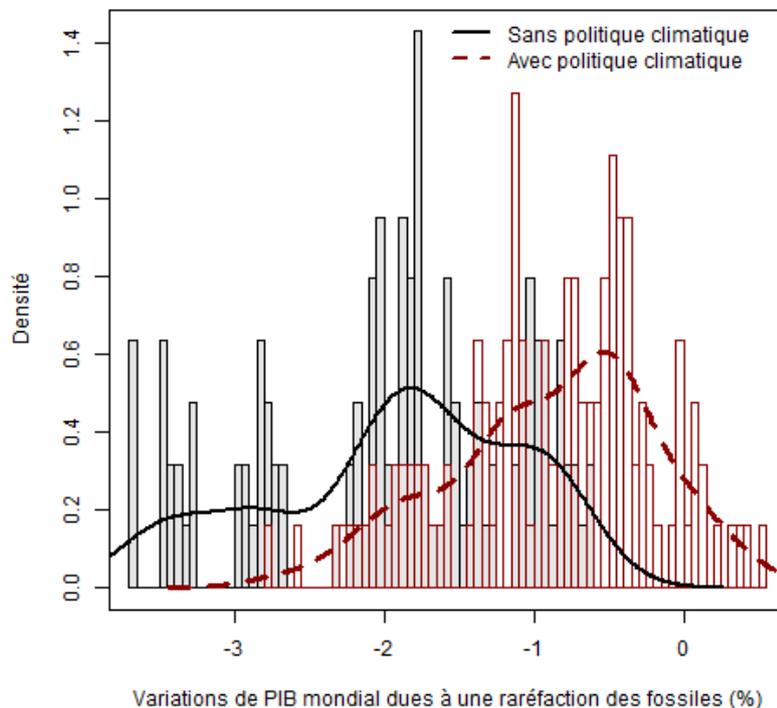
paramètres sont des entrées exogènes du modèle (la population, par exemple), et d'autres sont endogènes (l'efficacité énergétique) ; dans ce cas, il faut faire des hypothèses sur les paramètres qui se trouvent plus en amont dans le modèle (il faut par exemple calibrer l'élasticité-prix des efforts de réduction des dépenses énergétiques). Nous regroupons ensuite les paramètres en 7 groupes et combinons les alternatives pour générer 286 scénarios.

C'est cette base de données qui permet alors, par des traitements statistiques, d'apporter une réponse nouvelle à des questions qui se posent dans le cadre du GIEC, dont deux exemples sont présentés ci-dessous.

### *Estimation d'un co-bénéfice économique des politiques climatiques*

La première question qui trouve sa réponse à travers un raisonnement probabiliste, grâce à la base de données de scénarios, est celle du « co-bénéfice<sup>2</sup> » des politiques climatiques en termes d'assurance contre l'incertitude sur ressources fossiles.

La figure 4 représente la variation de PIB mondial due à une raréfaction des ressources fossiles, pour l'ensemble des scénarios. L'histogramme noir décrit les scénarios sans politique climatique tandis que l'histogramme rouge décrit les scénarios avec des politiques permettant de limiter le réchauffement climatique à 3°C.



<sup>2</sup> Le premier bénéfice des politiques climatique réside naturellement dans la réduction des dommages du changement climatique.

#### Figure 4 : Pertes de PIB selon les scénarios

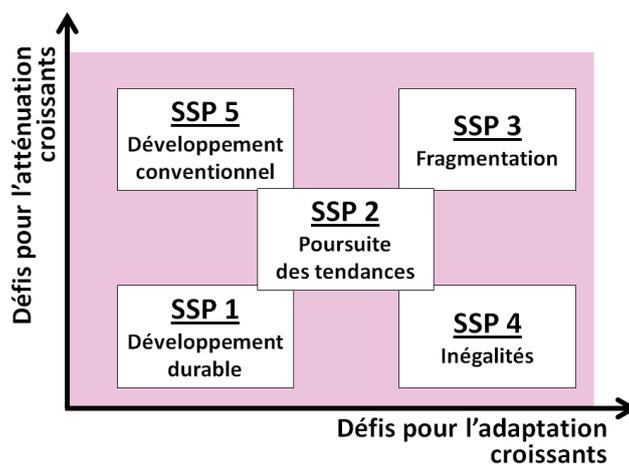
La comparaison des deux histogrammes montre l'intérêt des politiques climatiques pour réduire les pertes de PIB dues à la raréfaction des fossiles (adapté de Rozenberg et al., 2010)

En moyenne, les pertes sont significativement réduites dans les scénarios avec politiques climatiques (l'histogramme est décalé vers la droite) ; de plus, les politiques climatiques suppriment les scénarios à pertes très fortes (queue gauche de la distribution noire) en créant une résilience à la montée des prix des fossiles, via un signal prix plus précoce et mieux anticipé.

On peut par ailleurs quantifier cette assurance, qui s'élève en moyenne sur ces scénarios à 11 500 milliards de dollars, c'est-à-dire 19% du PIB mondial de 2009.

#### Identification des trajectoires socio-économiques de référence

Une autre question qui trouve une réponse ici concerne la caractérisation, sous forme de scénarios explicites, des cinq trajectoires socio-économiques de référence (les SSP) définies a priori, et qualitativement, par le GIEC, dans un plan de représentation dont les deux axes correspondent respectivement à « la capacité à atténuer le changement climatique » et « la capacité à s'y adapter » (figure 5)<sup>3</sup>.



#### Figure 5 : Les cinq trajectoires socio-économiques de référence du GIEC

Elles sont posées a priori dans ce plan de référence : tout le problème est de les expliciter

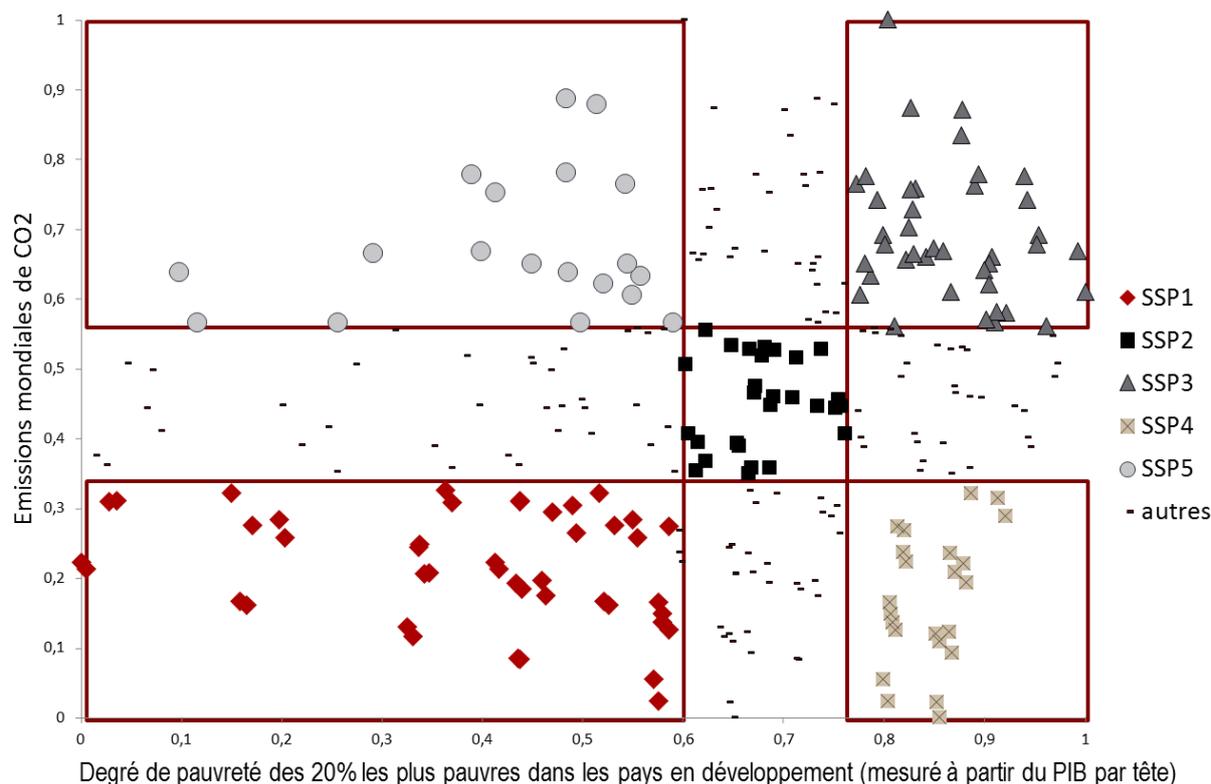
Pour positionner les scénarios de notre base de données dans ce plan de représentation, il faut d'abord exprimer les deux défis de l'adaptation et de l'atténuation sous forme de grandeurs calculables par le modèle. Pour l'axe des abscisses, nous retenons le degré de pauvreté des 20% les plus pauvres dans les pays en développement (mesuré à partir du PIB par tête), et pour l'axe des ordonnées les émissions de CO<sub>2</sub> mondiales. Chacun de nos scénarios s'y positionne alors sous forme d'un point (figure 6).

On remarque assez vite qu'il n'y a pas de scénario dans le coin en haut à gauche, c'est-à-dire dans lequel les problèmes de pauvreté sont résolus alors que les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> sont très

<sup>3</sup> Pour plus d'éléments sur le contexte de cet exemple, le lecteur est invité à consulter la partie concernant les scénarios du GIEC, dans l'article intitulé « Prospective énergétique : le possible, le souhaitable et l'acceptable », publié dans ce même numéro

élevées. Autrement dit, d'après le modèle utilisé, il n'est pas possible de venir à bout des problèmes de développement et d'extrême pauvreté sans faire des efforts en termes d'efficacité énergétique et de développement d'énergies alternatives, à cause de l'accès limité aux ressources fossiles d'ici la fin du 21<sup>e</sup> siècle.

On décide ensuite de regrouper les scénarios en cinq familles, correspondant globalement aux positions des cinq SSP sur la figure de principe. Pour cela, on définit deux seuils pour chaque axe, de telle sorte qu'un tiers des scénarios se trouve en dessous du premier seuil et un tiers au-dessus du second (fig. 6).



**Figure 6 : Catégorisation des scénarios de la base**

*Le plan de représentation des scénarios choisi ici permet de les regrouper en cinq familles renvoyant vers les cinq trajectoires socio-économiques de référence du GIEC<sup>4</sup>*

L'algorithme PRIM (« Patient Rule Induction Method ») est alors utilisé pour retrouver les déterminants caractéristiques de chaque famille de scénarios constituant un SSP. Par exemple, le SSP1 (dans lequel il sera facile de s'adapter et d'atténuer le changement climatique) est caractérisé par une population assez faible, des progrès en termes d'équité, des technologies bas-carbone bon marché et une grande sobriété énergétique. Ces résultats peuvent sembler assez intuitifs, mais il est intéressant aussi de noter que les autres déterminants modélisés, par exemple la vitesse de croissance de la

<sup>4</sup> Les valeurs des indicateurs sont normalisées entre zéro et un, ces deux bornes correspondant aux valeurs minimales et maximales des indicateurs pour la distribution des résultats.

productivité du travail, n'ont pas d'impact sur le fait qu'un scénario se trouve dans cette zone de l'espace des SSP, ou non.

Bien sûr, les résultats dépendent des indicateurs choisis pour mesurer les défis pour l'atténuation et pour l'adaptation ; il est possible de répéter l'analyse avec des indicateurs alternatifs ou des indicateurs composites. A partir des informations obtenues sur les déterminants principaux de chacun des SSP, il est alors possible de choisir des scénarios représentatifs de chacun d'entre eux.

#### 4. Conclusion

La construction et l'exploitation systématique de bases de données de scénarios répondent aux défis de la prise en compte des incertitudes multiples dans les exercices de prospective quantitative. En passant d'un petit nombre de scénarios incarnant des visions alternatives des futurs possibles à une base de données explorant l'espace des plausibles, elle permet de s'affranchir d'un choix a priori, souvent difficile et contraint, sur les hypothèses de départ à retenir. En analysant la base de données de résultats, il est possible de découvrir des résultats éventuellement contre-intuitifs et dépassant des positions préconçues.

Cette approche donne des éclairages nouveaux pour la décision : (i) l'évaluation de la robustesse des résultats et mécanismes mis en lumière, (ii) l'identification de « comportements » émergents dans un ensemble de scénarios qui permettent d'extraire des informations plus riches pour la décision, tels que les conditions de compromis ou synergies entre plusieurs critères dans une décision multicritère, ou une analyse dynamique pour relier les dynamiques de court-terme avec les développements à plus long-terme, (iii) la sélection d'un petit nombre de scénarios « pertinents » pour une étude détaillée.

L'originalité de cette nouvelle approche est aussi d'inverser les rôles habituels dans l'articulation entre qualitatif et quantitatif : le quantitatif devient exploratoire, pour tirer des enseignements qualitatifs de l'exploration systématique de grands ensembles de trajectoires quantifiées.

Cette approche a été illustrée ici à travers le cas du changement climatique à l'aide du modèle Imacim-R, mais elle peut bien entendu être appliquée avec tout modèle et sur tout sujet. Elle peut être particulièrement éclairante dans les cas où de nombreuses incertitudes sont en jeu et où les mécanismes à l'œuvre comptent des non-linéarités et des effets de rétroactions.

#### **Pour aller plus loin**

##### **- Sur les méthodes**

##### ***Méthodes de « datamining » et « découverte de scénario »***

Bryant, Benjamin, Robert J. Lempert. 2010. Thinking inside the box: A participatory, computer-assisted approach to scenario discovery. *Technological Forecasting & Social Change* 77 (2010) 34–49

Groves, David G., and Robert J. Lempert, "A New Analytic Method for Finding Policy-Relevant Scenarios," *Global Environmental Change*, Vol. 17, No. 1, 2007, pp. 73–85.

### ***Méthodes de « décision robuste »***

Lempert, Robert J., Steven W. Popper, David G. Groves, Nidhi Kalra, Jordan R. Fischbach, Steven C. Bankes, Benjamin P. Bryant, Myles T. Collins, Klaus Keller, Andrew Hackbarth, Lloyd Dixon, Tom LaTourrette, Robert T. Reville, Jim W. Hall, Christophe Mijere and David J. McInerney. *Making Good Decisions Without Predictions: Robust Decision Making for Planning Under Deep Uncertainty*. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 2013. [http://www.rand.org/pubs/research\\_briefs/RB9701](http://www.rand.org/pubs/research_briefs/RB9701).

#### **- Sur les applications**

### ***Etude de sensibilité et raisonnement probabiliste***

Rogelj, J., McCollum, D.L., Reisinger, A., Meinshausen, M., Riahi, K. 2013. Probabilistic cost estimates for climate change mitigation. *Nature* 493, 79–83 (03 January 2013)

Rozenberg, J., Hallegatte, S., Vogt-Schilb, A., Sassi, O., Guivarch, C., Waisman, H., Hourcade, J.-C. 2010. Climate policies as a hedge against the uncertainty on future oil supply. *Climatic Change*, August 2010, Volume 101, Issue 3-4, pp 663-668

### ***Décision multicritère et mise en évidence de compromis***

Guivarch, C., Monjon, S., Vogt-Schilb, A., Rozenberg, J. 2013. Evaluer Les Interactions entre Politique climatique et Sécurité énergétique en Europe, rapport final du projet ELIPSE financé par le CSFRS. <http://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00800492>

### ***Datamining et mise en évidence des conditions d'un résultat***

McJeon, H.C., Clarke, L., Kyle, P., Wise, M., Hackbarth, A., Bryant, B.P., Lempert, R.J. 2011. Technology interactions among low-carbon energy technologies: What can we learn from a large number of scenarios? *Energy Economics*, Volume 33, Issue 4, July 2011, Pages 619–631

Rozenberg J et al. (in review) A scenario elicitation methodology to map the space of possible future mitigative and adaptive capacity. Submitted to *Climatic Change*.

### ***Décision robuste***

Dixon, Lloyd, Robert J. Lempert, Tom LaTourrette, and Robert T. Reville, *The Federal Role in Terrorism Insurance: Evaluating Alternatives in an Uncertain World*, Santa Monica, Calif.: RAND Corporation, MG-679-CTRMP, 2007, <http://www.rand.org/pubs/monographs/MG679.html>.

Lempert, Robert J., and David G. Groves, "Identifying and Evaluating Robust Adaptive Policy Responses to Climate Change for Water Management Agencies in the American West," *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 77, No. 6, July 2010, pp. 960–974.