

Note d'analyse prospective n° 148
27 décembre 2013

PRODUIRE DES SCÉNARIOS PAR
CENTAINES : VERS UN RENOUVELLEMENT
DES APPROCHES PROSPECTIVES ?

Céline Guivarch et Julie Rozenberg

VIGIE

Système de veille mutualisée
sur l'évolution de l'environnement
stratégique des entreprises
et des organisations

futuribles
INTERNATIONAL

47 rue de Babylone, F-75007 Paris
Tél. + 33 (0)1 53 63 37 73
Fax + 33 (0)1 42 22 65 54
bprivey@futuribles.com
<http://www.futuribles.com>

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

Herman Kahn

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 futurs en eau d'un territoire ? 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 évaluation quantitative des trajectoires envisageables.

Dans l'approche classique, après avoir identifié les facteurs clefs 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 de 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 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.

Le travail présenté ici ¹ 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 (Centre international de recherche sur l'environnement et le développement) avec le modèle Imacim-R, dans le domaine de l'économie du changement climatique.

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 l'étude, la question qui se pose, les enjeux et le contexte, les objectifs, ainsi que les déterminants ou incertitudes clefs à considérer. Ceci conduit à choisir — ou développer — un ou plusieurs modèles pertinents pour réaliser l'étude, c'est-à-dire qui représentent des mécanismes reliant les déterminants iden-

¹ Les auteurs remercient Bernard David pour ses commentaires sur des versions antérieures de ce texte, dont une version plus courte est parue dans la revue *Futuribles*, n° 398, janvier-février 2013, p. 49-56.

tifiés à la question qui se pose. Ces déterminants sont ensuite traduits en paramètres du / des modèle(s).

Puis on construit le matériau de travail, 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 *a priori* comme 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 clefs 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 ² » 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).

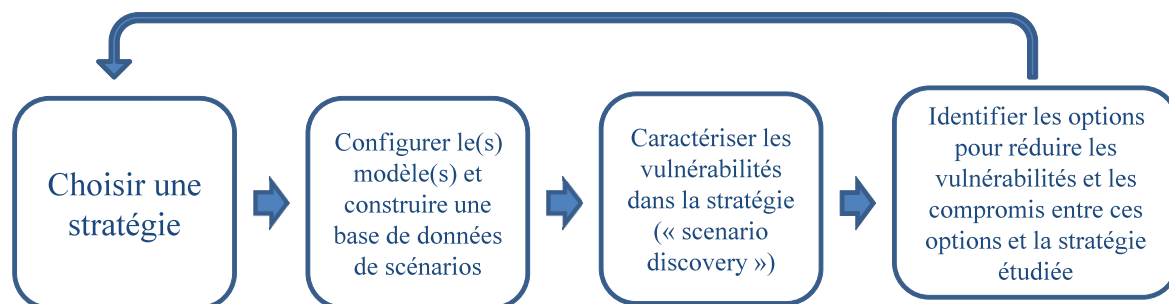
Dans ce cas, des modèles sont utilisés pour générer une base de données de scénarios dans laquelle chaque cas représente la performance d'une stratégie proposée dans un monde futur plausible. Des visualisations et analyses statistiques de cette base de données per-

² LEMPERT Robert J. *et alii*, *Making Good Decisions Without Predictions: Robust Decision Making for Planning Under Deep Uncertainty*, Santa Monica : RAND Corporation, 2013.

Produire des scénarios par centaines : vers un renouvellement des approches prospectives ?

mettent 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 — Étapes dans le processus de décision robuste



Source : adapté de LEMPERT Robert J. *et alii*, *op. cit.*

Ce type de processus a été appliqué dans des contextes divers. Par exemple, il a été utilisé pour rendre robustes à l'incertitude climatique les plans de gestion de l'eau à long terme de l'Inland Empire Utilities Agency de Californie du Sud³. 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 contribuables⁴.

Les fenêtres de passage favorables

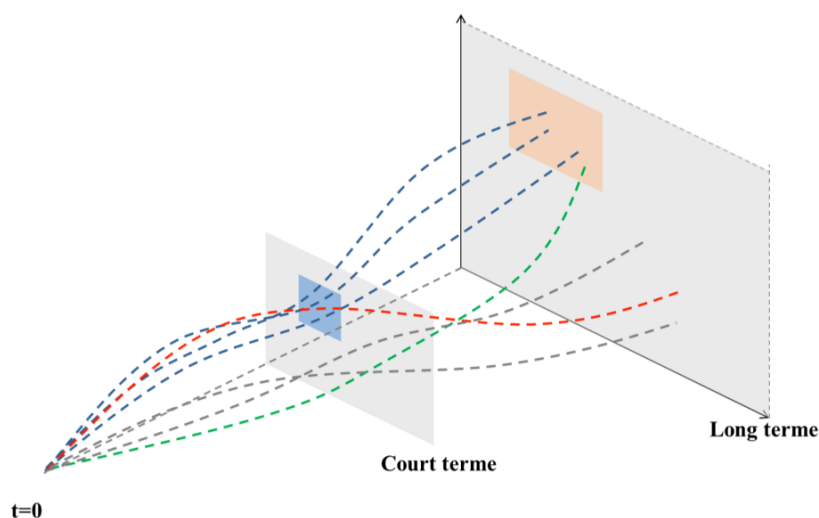
L'ensemble de scénarios peut également être analysé de façon dynamique, afin de relier le court terme et le plus long terme (figure 2). Une approche dynamique permet en effet de répondre à des questions du type « Où dois-je me trouver à court terme afin d'être bien placé pour atteindre tel ou tel objectif de long terme ? » Étant 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 passage (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.

³ LEMPERT Robert J. et GROVES David G., « 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, n° 6, juillet 2010, p. 960-974.

⁴ DIXON Lloyd, LEMPERT Robert J., LATOURRETTE Tom et REVILLE Robert T., *The Federal Role in Terrorism Insurance: Evaluating Alternatives in an Uncertain World*, Santa Monica : RAND Corporation, 2007.

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 l'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.

Illustrations avec une base de données de scénarios utilisée en 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. Elle utilise une base de données de scénarios technico-socio-économiques globaux, développée au CIRED avec le modèle Imacim-R, pour l'étude de l'économie du changement climatique.

La prise en compte des incertitudes est particulièrement importante et délicate s'agissant du changement climatique. Non seulement les éléments incertains sont nombreux, mais ils correspondent à des « incertitudes radicales », définies ici comme des situations dans lesquelles les décideurs ne connaissent pas ou ne sont pas d'accord sur la structure du modèle reliant actions et conséquences, ni sur les distributions de probabilités des paramètres clés

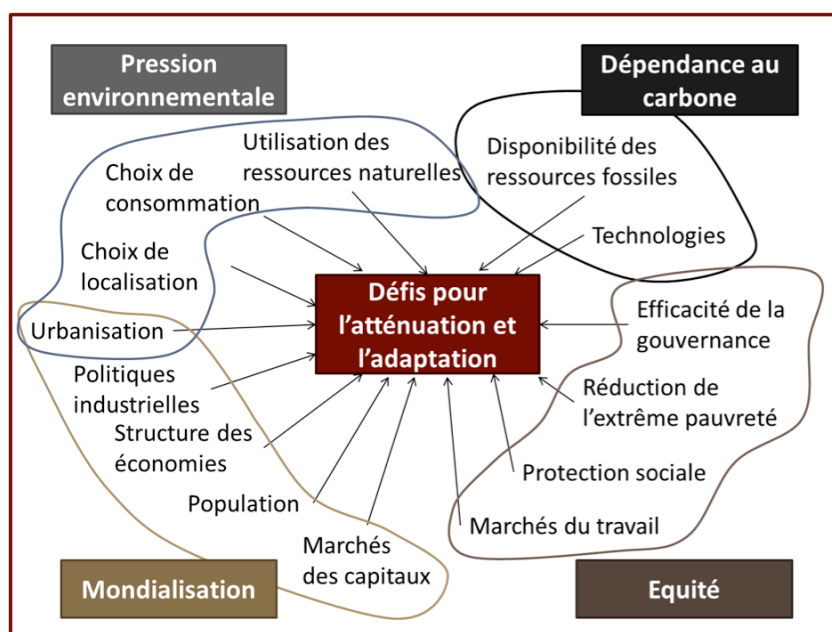
**Produire des scénarios par centaines :
vers un renouvellement des approches prospectives ?**

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 sur la 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 sept groupes et combinons les alternatives pour générer 286 scénarios.

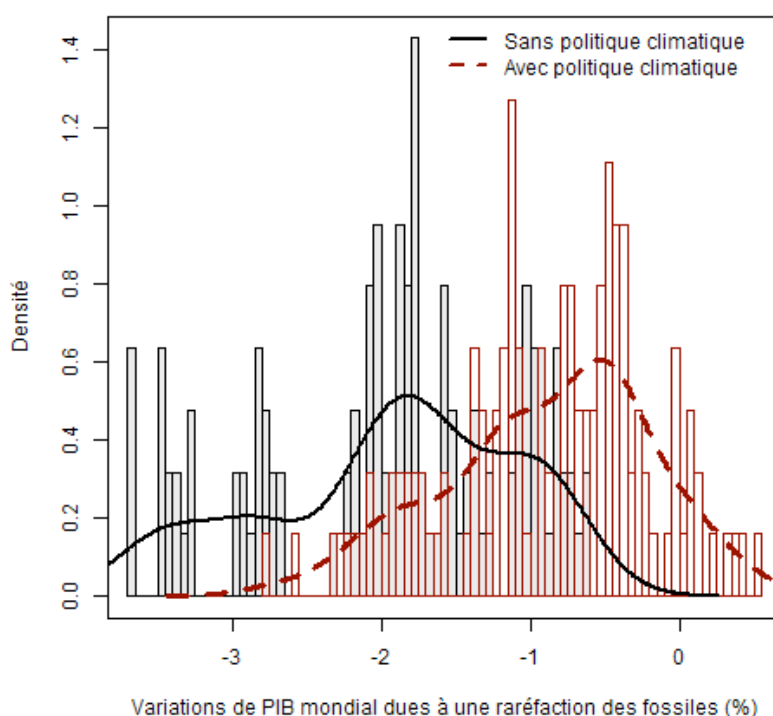
C'est cette base de données qui permet alors, par des traitements statistiques, d'apporter une réponse nouvelle à des questions qui se posent dans le cadre du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), dont deux exemples sont présentés ci-après.

Estimation d'un cobénéfice 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 « cobénéfice⁵ » des politiques climatiques en termes d'assurance contre l'incertitude sur les ressources fossiles.

La figure 4 représente la variation de produit intérieur brut (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 correspond aux scénarios avec des politiques permettant de limiter le réchauffement climatique à 3 °C.

Figure 4 — Évolution 2010-2050 du PIB mondial 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

Source : figure adaptée de ROZENBERG Julie *et alii*, « Climate Policies as a Hedge Against the Uncertainty on Future Oil Supply », *Climatic Change*, vol. 101, n° 3-4, août 2010, p. 663-668.

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.

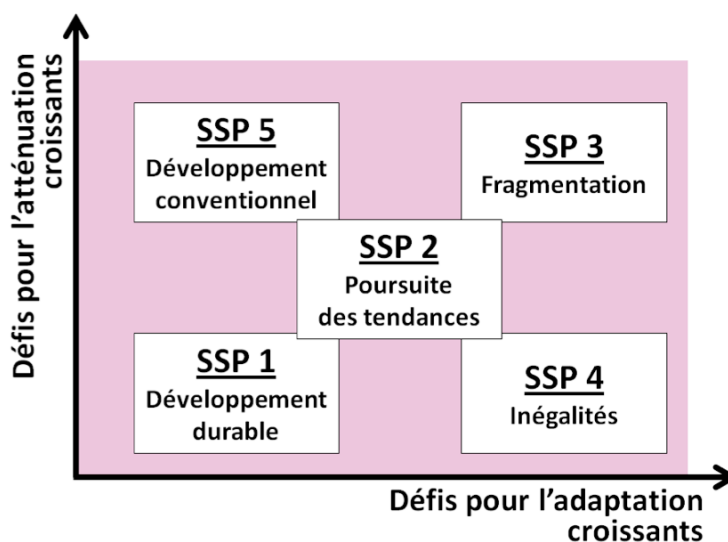
On peut par ailleurs quantifier cette assurance, qui s'élève en moyenne sur ces scénarios à 11 500 milliards de dollars US, c'est-à-dire 19 % du PIB mondial de 2009.

⁵ Le premier bénéfice des politiques climatiques réside naturellement dans la réduction des dommages du changement climatique.

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, *Shared Socioeconomic Pathways*) 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)⁶.

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



*Les trajectoires sont posées a priori dans ce plan de référence :
tout le problème est de les expliciter.*

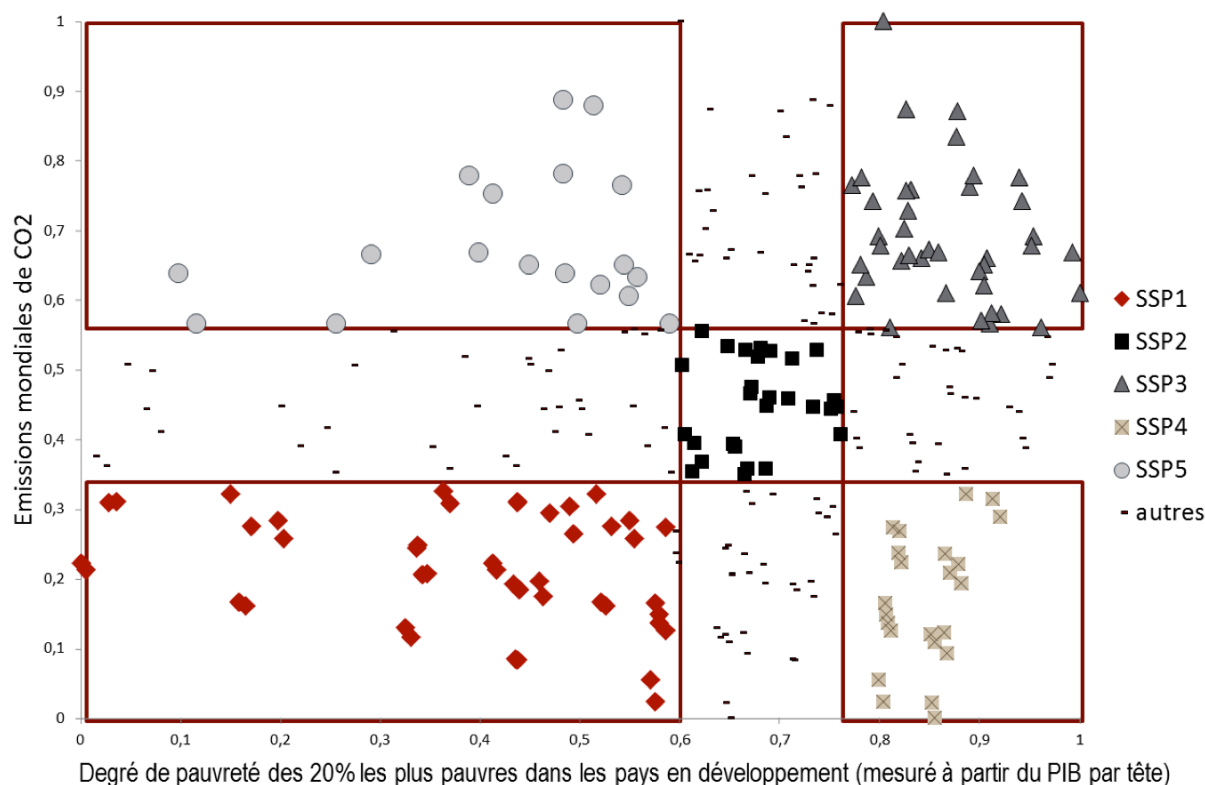
Pour positionner les scénarios de notre base de données dans ce plan de représentation, il faut d’abord exprimer les deux défis de l’adaptation et de l’atténuation sous forme de grandeurs calculables par le modèle. Pour l’axe des abscisses, nous retenons le degré de pauvreté des 20 % les plus pauvres dans les pays en développement (mesuré à partir du PIB par habitant), et pour l’axe des ordonnées les émissions mondiales de CO₂. Chacun de nos scénarios s’y positionne alors sous forme d’un point (figure 6, page suivante).

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 seraient résolus alors que les émissions mondiales de CO₂ seraient très 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, en raison de l’accès limité aux ressources fossiles d’ici la fin du XXI^e 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 (figure 6).

⁶ Pour plus d’éléments sur le contexte de cet exemple, le lecteur est invité à consulter la partie concernant les scénarios du GIEC, dans DAVID Bernard, LATTRE-GASQUET Marie (de), MATHY Sandrine, MONCOMBLE Jean-Eudes et ROZENBERG Julie, « Prospective énergétique : le possible, le souhaitable et l’acceptable », *Futuribles*, n° 398, janvier-février 2014, p. 37-47.

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.

N.B. : 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.

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 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 retenus pour mesurer les défis de l'atténuation et de l'adaptation. On peut répéter l'analyse avec des indicateurs alternatifs ou des indicateurs composites. À partir des informations obtenues sur les déterminants principaux de chacun des SSP, il est alors possible de choisir des scénarios vraiment représentatifs de chacun d'entre eux.

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

**Produire des scénarios par centaines :
vers un renouvellement des approches prospectives ?**

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, elles permettent 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 :

- l'évaluation de la robustesse des résultats et mécanismes mis en lumière ;
- l'identification de « comportements » émergents dans un ensemble de scénarios, qui permettent d'extraire des informations plus riches pour la décision, telles 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 ;
- 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 Imaclim-R, mais elle peut bien entendu être appliquée avec tout modèle et sur tout sujet. Elle sera 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 rétroaction.

Références pour aller plus loin

Sur les méthodes

Méthodes de *datamining* et découverte de scénario

BRYANT Benjamin P. et LEMPERT Robert J., « Thinking Inside The Box: A Participatory, Computer-assisted Approach to Scenario Discovery », *Technological Forecasting & Social Change*, vol. 77, 1, janvier 2010, p. 34-49.

GROVES David G. et LEMPERT Robert J., « A New Analytic Method for Finding Policy-Relevant Scenarios », *Global Environmental Change*, vol. 17, n° 1, 2007, p. 78-85.

Méthodes de décision robuste

LEMPERT Robert J. *et alii*, *Making Good Decisions Without Predictions: Robust Decision Making for Planning Under Deep Uncertainty*, Santa Monica : RAND Corporation, 2013.

Sur les applications

Étude de sensibilité et raisonnement probabiliste

ROGELJ Joeri *et alii*, « Probabilistic Cost Estimates for Climate Change Mitigation », *Nature*, vol. 493, 7430, janvier 2013, p. 79-83.

ROZENBERG Julie *et alii*, « Climate Policies as a Hedge Against the Uncertainty on Future Oil Supply », *Climatic Change*, vol. 101, n° 3-4, août 2010, p. 663-668.

Décision multicritère et mise en évidence de compromis

GUIVARCH Céline, MONJON Stéphanie, ROZENBERG, Julie et VOGT-SCHILB Adrien, *ÉLIPSE : Évaluer les interactions entre politique climatique et sécurité énergétique en Europe*, Paris : rapport final du projet ELIPSE financé par le Conseil supérieur de la formation et de la recherche stratégiques, 2013. URL : http://halshs.archives-ouvertes.fr/docs/00/80/04/92/PDF/ELIPSE_rapport_final.pdf

Datamining et mise en évidence des conditions d'un résultat

MCJEON Hawon C., *et alii*, R.J. 2011. « Technology Interactions among Low-carbon Energy Technologies: What Can We Learn from a Large Number of Scenarios? » *Energy Economics*, vol. 33, 4, juillet 2011, p. 619-631.

ROZENBERG Julie *et alii*, « A Scenario Elicitation Methodology to Map the Space of Possible Future Mitigative and Adaptive Capacity », en cours d'évaluation auprès de *Climatic Change*.

Décision robuste

DIXON Lloyd, LEMPERT Robert J., LATOURRETTE Tom et REVILLE Robert T., *The Federal Role in Terrorism Insurance: Evaluating Alternatives in an Uncertain World*, Santa Monica : RAND Corporation, 2007.

LEMPERT Robert J. et GROVES David G., « 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, n° 6, juillet 2010, p. 960-974.