

Produire des scénarios par centaines

COMMENT LES DÉMARCHES STATISTIQUES
RENOUVELLENT LES APPROCHES PROSPECTIVES

PAR CÉLINE GUIVARCH ET JULIE ROZENBERG ¹

La plupart des démarches prospectives nécessitant une évaluation quantitative des scénarios retenus procèdent en deux temps : d'abord une exploration qualitative des déterminants à partir de laquelle on choisit un nombre restreint de jeux d'hypothèses, débouchant sur un nombre lui aussi restreint de scénarios ; puis l'application d'un modèle mathématique traduisant en données d'entrée les hypothèses retenues afin de quantifier les différents scénarios identifiés. Néanmoins, comme le souligne cet article, la complexité croissante des contextes et les interactions possibles des différents facteurs intervenant dans les champs d'étude remettent en question ce mode de fonctionnement : la représentativité des hypothèses retenues ne constitue plus une garantie de la qualité des scénarios qui en découlent.

C'est pourquoi les auteurs proposent, dans cet article, de procéder différemment, en conservant tous les déterminants identifiés dans le champ de l'étude et en faisant tourner les modèles des centaines ou milliers de fois pour en sortir autant de scénarios possibles, les choix qualitatifs étant alors opérés, dans un second temps, dans l'« espace-cible » de ces scénarios. Elles présentent ici cette méthode alternative consistant à construire des bases de données de scénarios pour explorer l'espace des incertitudes, et son intérêt pour la prospective, ainsi qu'un cas concret d'utilisation de cette méthode dans le domaine de l'économie du changement climatique. S.D. ■

1. Respectivement chercheur à l'École des Ponts ParisTech et au CIRED (Centre international de recherche sur l'environnement et le développement), et chercheur au CIRED. Les auteurs remercient Bernard David pour ses commentaires sur les versions antérieures de ce texte ; cette version a grandement bénéficié de ses suggestions. Une version plus détaillée de cet article est disponible sur le site Internet de Futuribles, URL : <http://www.futuribles.com/fr/base/document/produire-des-scenarios-par-centaines/>.

« Le futur le plus probable n'existe pas »

Herman Kahn

Construire une centrale à gaz, un champ d'éoliennes ou un barrage hydro-électrique 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, l'exploration qualitative précède la traduction quantitative. Plus précisément, le savoir-faire prospectif consiste à sélectionner quelques jeux d'hypothèses contrastées, qui permettent de construire un petit nombre de scénarios qui ont du sens et sont représentatifs du champ des futurs possibles. On traduit ensuite les hypothèses retenues pour ces scénarios en données d'entrée des modèles mathématiques décrivant la dynamique des systèmes étudiés, pour quantifier les scénarios.

Or, la complexité des situations réelles, où les effets croisés entre les différents facteurs influents peuvent conduire à des trajectoires totalement contre-intuitives, remet en cause ce séquençage du travail : la représentativité des hypothèses retenues en entrée ne garantit plus la représentativité des scénarios produits en sortie.

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 CIREAD avec le modèle Imaclim-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 identifiés 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.

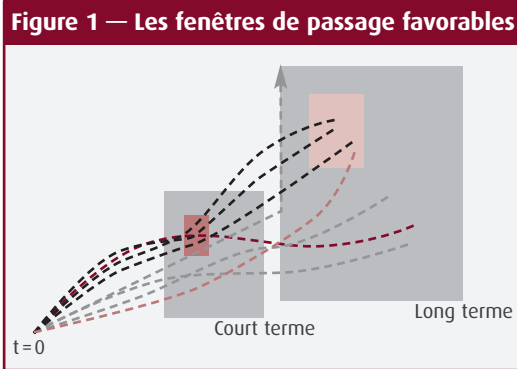
Lorsqu'on ne dispose que de quelques scénarios, il n'est pas possible de savoir si les évaluations chiffrées et mécanismes mis en évidence sont robustes à une variation des paramètres clefs ou si l'on se trouve dans un cas particulier. Avec une base de données de scénarios, les quantifications sont associées 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.

L'ensemble de scénarios peut également être analysé de façon dynamique, afin de relier le court terme et le plus long terme (figure 1). 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.

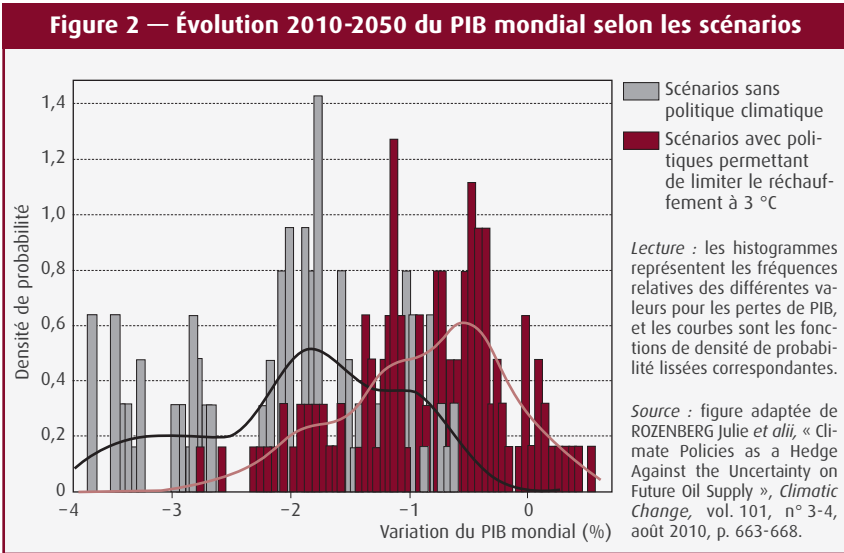
Enfin, dans les situations où l'on a quand même besoin de sélectionner un petit nombre de scénarios (pour communiquer ou pour harmoniser des études qui vont s'appuyer sur ces scénarios), l'utilisation d'une base de données de scénarios permet de sélectionner ceux d'entre eux qui seront les plus représentatifs des caractères que l'on souhaite retenir.

Illustration avec une base 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 Imaclim-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 clefs 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.

Pour construire la base de données de scénarios, l'ensemble des paramètres identifiés comme jouant un rôle dans l'économie du changement climatique (liés à la mondialisation, la dynamique sociale, l'environnement...) a été organisé en sept groupes. Les différentes combinaisons d'hypothèses ont alors généré 286 scénarios. C'est cette base de données qui permet, par des traitements statistiques, d'apporter une réponse nouvelle (ou une réponse tout court) 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 « cobénéfice ² » des politiques climatiques en termes d'assurance contre l'incertitude sur les ressources fossiles. Le décideur politique est en effet soucieux de savoir si les décisions qu'il va prendre ne sont qu'une charge financière nouvelle, ou si elles seront aussi porteuses de bénéfices à terme.

La figure 2 représente la variation de produit intérieur brut (PIB) mondial entre 2010 et 2050 (avec un taux d'actualisation ³ de 3 %) due à une raréfaction des ressources fossiles, pour l'ensemble des scénarios. L'histogramme gris décrit les scénarios sans politique climatique tandis que l'histogramme bordeaux correspond aux scénarios avec des politiques permettant de limiter le réchauffement climatique à 3 °C.

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 grise) en créant une résilience à la montée des prix des fossiles, via un signal prix plus précoce et mieux anticipé.

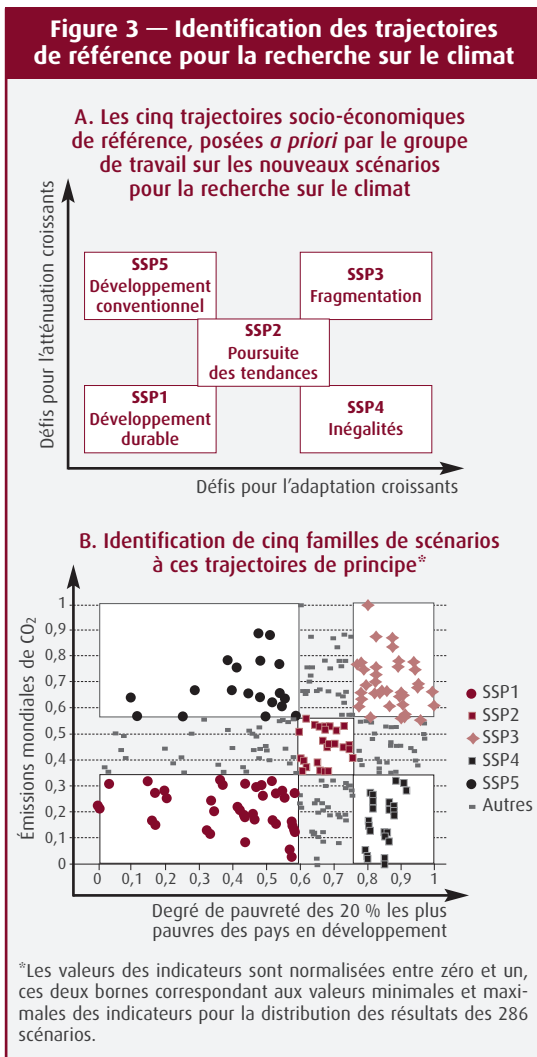
2. Le premier bénéfice des politiques climatiques réside naturellement dans la réduction des dommages du changement climatique.

3. Le taux d'actualisation permet de donner une valeur actuelle à des flux d'argent qui interviendront dans le futur (NDLR).

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.

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*) retenues dans le cadre des nouveaux scénarios pour la recherche sur le climat.



En effet, le groupe de travail sur ces nouveaux scénarios a posé *a priori* le principe de ces cinq trajectoires, qui se différencient selon leur capacité à répondre aux défis de l'atténuation du changement climatique d'une part, de l'adaptation à ce changement de l'autre (figure 3.A). Toute la question est alors de préciser concrètement ce que sont ces trajectoires.

L'idée est alors de positionner les 286 scénarios de la base dans un référentiel dont les deux axes sont homologues de ceux du schéma de principe (figure 3.B) : pour l'axe des abscisses, on retient ici 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. En calculant la valeur de ces deux indicateurs dans chacun des scénarios, on peut les positionner dans ce référentiel.

Pour délimiter des zones homologues des positions de principe des cinq SSP, on définit alors 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. C'est ainsi qu'apparaissent cinq familles de scénarios, que l'on identifie aux cinq SSP.

L'algorithme PRIM (*Patient Rule Induction Method*) est alors utilisé pour retrouver les déterminants caractéristiques de chaque famille. 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.

On peut remarquer aussi 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.

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.



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, elles permettent de s'affranchir d'un choix *a priori*, souvent difficile et contraignant, 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. ■

Agriculture et géopolitique

rivalités • puissance • coopération



Guyancourt • 12 et 13 février 2014

Colloque international SFER AGP 2014

organisé par la Société française
d'économie rurale (SFER),
en partenariat avec Futuribles

Objectif → comprendre en quoi l'agriculture est (re)devenue un objet géopolitique :

- Porter un double regard, scientifique et institutionnel, sur la logique conflictuelle à l'œuvre sur les marchés mondiaux agricoles, et sur les ressources foncières et hydriques.
- Souligner la priorité de ne pas dissocier l'aspect agricole et alimentaire des autres registres (sécurité / souveraineté alimentaire, foncier, eau, énergie, voire climat).
- Scruter les aspects régionaux de la conflictualité agricole et alimentaire et de la précarité des approvisionnements (Méditerranée et Moyen-Orient notamment).
- S'interroger sur le rôle qu'entend jouer l'Union européenne et singulièrement la France dans cette économie agricole mondiale en pleine mutation).

Lieu : Université de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines
Bâtiment d'Alembert • 5-7 boulevard d'Alembert • 78280 Guyancourt

Inscription / informations / contact : tél. + 33 (0)9 65 00 37 35
E-mail sfer.agp2014@gmail.com • Site Internet <http://www.sfer.asso.fr>