

Cadre prospectif et trajectoires énergétiques contrastées du Shift



Résumé	2
Introduction.....	3
Les 4 quadrants : un cadre original et cohérent pour scénariser.....	4
Rogeautilo, notre « machine à scénarios »	6
Principaux résultats	7
Offre en énergies fossiles	7
Bouquets électriques diversifiés	8
4 possibilités pour la mobilité passager de demain	9
Dans une vision « Loin de limites », pas d'équilibre énergétique possible.....	9
Conclusion	10
Annexes	11
Détails sur la scénarisation sectorielle dans Rogeautilo	11
Les hypothèses sur les réserves ultimes des ressources fossiles	11
Les hypothèses sur la demande dans le secteur des bâtiments	12

Résumé

Ce document de travail présente quelques résultats issus d'une démarche originale de prospective mise en œuvre par The Shift Project. La méthode utilisée, appelée « paradigme des 4 quadrants », intègre pleinement l'incertitude inhérente à l'exercice de la prospective, et allie description qualitative et description quantitative de la société future, ce qui permet de mettre au cœur de la démarche la cohérence de la vision de société construite. Les scénarios ont été réalisés avec le modèle Rogeaulito, ils sont de périmètre mondial et d'horizon temporel 2100.

Nous avons utilisé deux gradients que nous pensons primordiaux pour structurer les mondes possibles : la capacité des hommes à s'organiser et la contrainte carbone perçue par la société future. Cette dernière notion regroupe à elle seule la contrainte « amont » du carbone (le carbone dans sa forme d'hydrocarbure : tensions sur l'accès aux ressources fossiles) et la contrainte « aval » (carbone sous forme de gaz à effet de serre, CO₂ principalement, une fois les hydrocarbures brûlés).

Les premiers résultats permettent d'éclairer les choix collectifs et permettent de tirer une première sonnette d'alarme : l'approche exploratoire que nous avons menée dans un scénario tendanciel a montré que, fautes d'anticipation, une grave crise des carburants liquides était à prévoir dans le futur proche (1 à 2 décennies).

Introduction

« Gouverner, c'est prévoir ». Pour illustrer cet adage¹, notons qu'il est coutumier de faire appel à des scénarios énergétiques afin de dimensionner les investissements nécessaires, prendre à temps les bonnes décisions ou encore anticiper les transitions. Plus généralement, ces scénarios servent à aider la décision collective en imaginant – autant que faire se peut, car la prédiction parfaite est impossible ! – les sociétés énergétiques possibles pour demain.

Nous avons voulu **mettre notre « machine à scénarios », appelée Rogeaulito, à l'épreuve de la prospective en parlant du, ou plutôt des, mondes futurs** ; on présentera dans le présent document quelques aperçus de ce travail de scénarisation, en insistant sur le mode de construction des scénarios : le paradigme des 4 quadrants. Ce cadre prospectif original se caractérise par le fait :

- Qu'il intègre pleinement l'incertitude inhérente à l'exercice de la prospective ;
- Qu'il allie une description qualitative de la société future et paramètres quantitatifs d'un scénario, assurant la cohérence de la vision de société ainsi construite.

En effet, **nous n'avons pas imaginé un futur possible pour la société mondiale d'ici 2100, mais 4 mondes, qui portent chacun leur cohérence interne**. Par ailleurs, nous voulions intégrer des paramètres autres que ceux qu'on retrouve dans beaucoup de scénarios². Nous avons ainsi introduit beaucoup de variables, souvent plus qualitatives, et tout aussi structurantes : par exemple la forme des villes, le régime alimentaire des peuples ou encore la façon de se déplacer des habitants.

Ces variables ont été prises en compte en amont du processus de modélisation, s'assurant ainsi *ex ante* que l'ensemble de ces variables ne forment ni plus ni moins qu'une société cohérente (voir Figure 1 pour l'illustration d'une partie des variables que nous avons pris en compte).

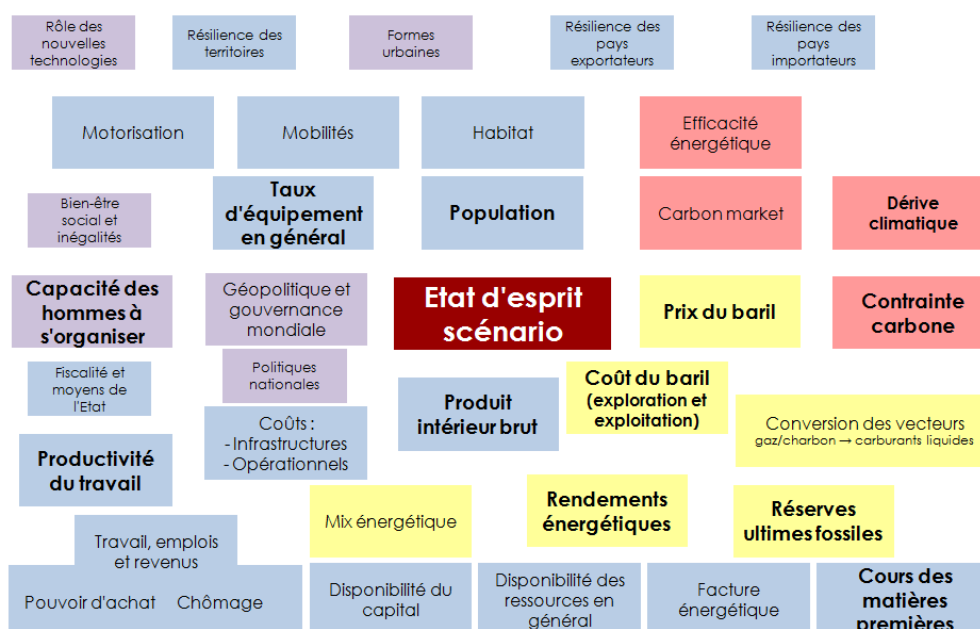


Figure 1 : quelques variables qui forment « l'état d'esprit » d'un scénario, c'est-à-dire la vision sociale qui le sous-tend

¹ On prête cette citation à Emile de Girardin, journaliste et homme politique français du 19^{ème} siècle.

² Parmi les paramètres souvent pris en compte, citons les évolutions : de la population, du Produit Intérieur Brut (PIB), des coûts d'investissements, des émissions de CO₂, ou encore des emplois créés, détruits, modifiés.

Les 4 quadrants : un cadre original et cohérent pour scénariser

Nous avons pris appui sur un cadre apparu pour la première fois dans la « Lettre du Carbone » de Carbone 4³. Les mondes modélisés sont au nombre de 4, « Perte de contrôle », « Loin des limites », « Nouvelle donne verte » et « Atterrissage forcé ». Ils se placent de la façon suivante dans notre cartographie des futurs :

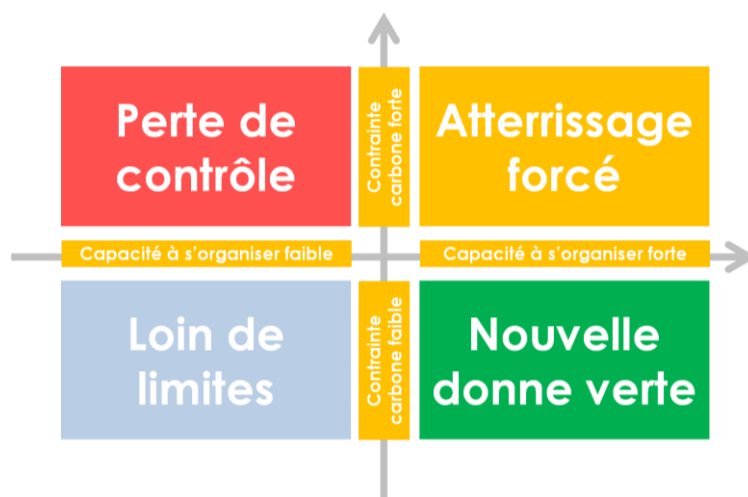


Figure 2 : Cartographie des futurs dans le paradigme des 4 quadrants

Nous avons utilisé **deux gradients** que nous pensons primordiaux pour structurer les mondes possibles :

- **La capacité des hommes à s'organiser : de faible lorsque le monde qu'on va imaginer est profondément individualiste** (« Perte de contrôle » et « Loin des limites »), **à fort lorsque les citoyens du monde modélisé ont un sens aigu du bien commun** (« Nouvelle donne verte » et « Atterrissage forcé ») ;

Cette capacité à s'organiser peut prendre plusieurs formes : à travers des entités supranationales comme le sont l'ONU ou l'OMC, ou au contraire à des échelons bien plus petits comme les communautés de communes, les conseils de quartier ou encore les syndicats.

Concrètement, cette dichotomie sur le premier gradient peut se traduire par des différences cruciales pour le système énergétique en termes d'investissements et de grands-projets en général : **un monde où l'organisation collective prédomine, c'est un monde dans lequel des signaux fiables et durables sont donnés par les pouvoirs publics, permettant ainsi d'allouer efficacement les investissements** (de les « flécher »). Ainsi, dans ce monde-là, les réalisations intenses en capital sont rendues possibles, comme typiquement les projets de CCS⁴ ou encore les centrales électronucléaires : dans les mondes à « gauche » de notre cartographie des futurs, les centrales

³ [Lettre du Carbone N°3, février 2013 « Que dire sur la mobilité en France en avenir incertain ? L'approche par scénarios de Carbone 4 »](#), écrite par Hélène Le Teno, Roman Ledoux et Emmanuelle Paillat.

⁴ « Carbon capture and storage », littéralement « captation et stockage du carbone » : il s'agit d'équiper les centrales thermiques à flamme (gaz, fioul et charbon) avec des dispositifs pour récupérer le CO₂ des gaz d'échappement (ou faire en sorte que la combustion n'en n'émette pas de façon plus générale). Le carbone ainsi capté doit ensuite être stocké, par exemple en étant enfoui dans des anciens gisements de gaz naturel aujourd'hui épuisés. Ce genre de technologie n'est pas encore commercialement rentable en Europe, elle a l'inconvénient de diminuer les rendements des centrales électriques et d'être intensive en capital.

nucléaires s'arrêtent, évincées par une production électrique de plus en plus portée vers le gaz (moins intensif en capital).

En termes économiques, **on peut qualifier les mondes de gauche par un taux d'actualisation élevé** (les coûts d'aujourd'hui sont de loin prépondérants par rapport aux coûts de demain) tandis que le monde de droite est déterminé par un taux d'actualisation faible : de par leur organisation collective, les hommes portent une attention particulière à éviter les coûts futurs, en acceptant de payer plus aujourd'hui.

- **Deuxième gradient de notre cartographie des futurs : la contrainte carbone**, qui regroupe à elle seule la contrainte « amont » du carbone (le carbone dans sa forme d'hydrocarbure) et la contrainte « aval » (carbone sous sa forme de gaz à effet de serre, CO₂ principalement, une fois que les hydrocarbures ont été brûlés).

La contrainte carbone telle que nous l'entendons ici lie donc **deux problématiques : la pression sur la société des effets du changement climatique, composée des effets des pics des ressources hydrocarbures (pic pétrolier puis pic gazier)**. Dans notre démarche, nous avons modélisé des mondes où ces contraintes étaient perçues de façons singulièrement différentes : dans le bas de la cartographie des futurs, nous avons ainsi 2 visions où la contrainte carbone n'est pas perçue par la société, pour des raisons distinctes : dans « Loin des limites », les ressources limitées et le changement climatique ne sont pas des problématiques qui sont prises en compte dans les orientations de la société, et à l'inverse dans « Nouvelle donne verte », une entente mondiale efficace a permis de réduire les émissions de gaz à effet de serre de l'humanité d'une part, et de limiter le déclin de la production d'hydrocarbures ; en effet, nous avons imaginé que du fait d'une politique de quotas ou d'un marché efficient du pétrole et du gaz, les productions suivaient un plateau ondulant plutôt qu'une pente raide de déclin.

On a pour ainsi dire coupé le monde en 4 quadrants, qui forment 4 futurs contrastés ayant chacun sa cohérence interne :

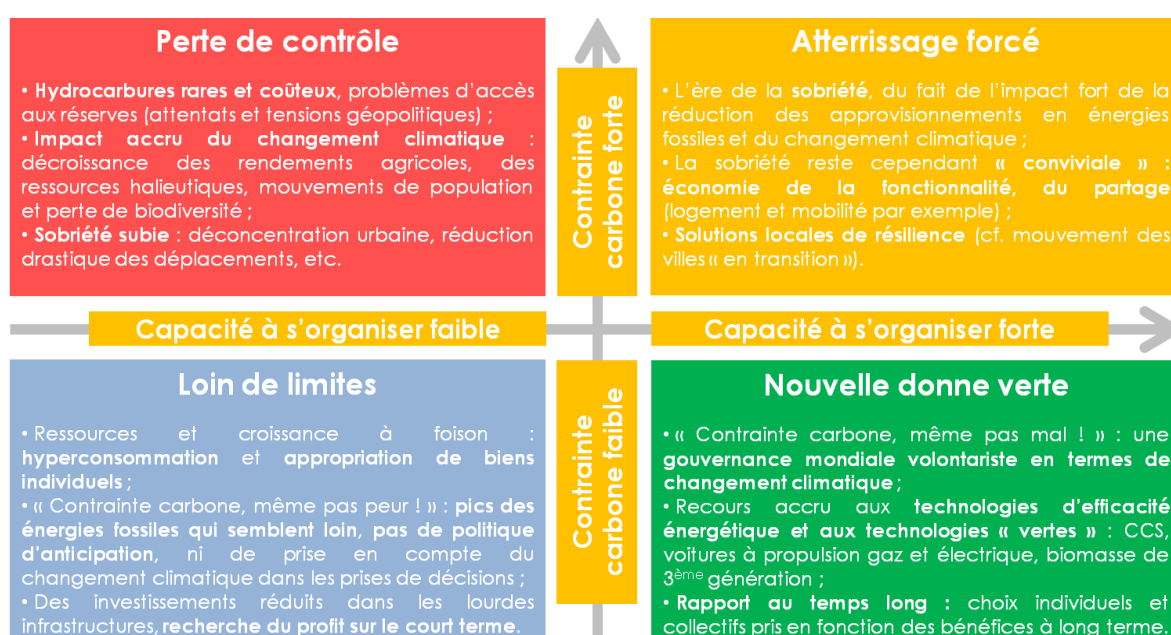


Figure 3 : quelques éléments illustratifs de chacun des 4 quadrants

Rogeautilo, notre « machine à scénarios »

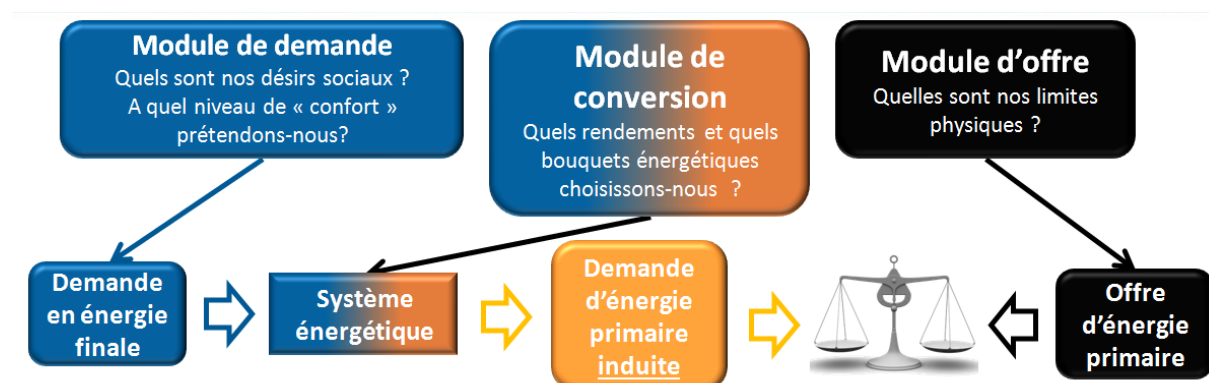


Figure 4 : structure de Rogeautilo, outil de scénarisation physique et sectoriel

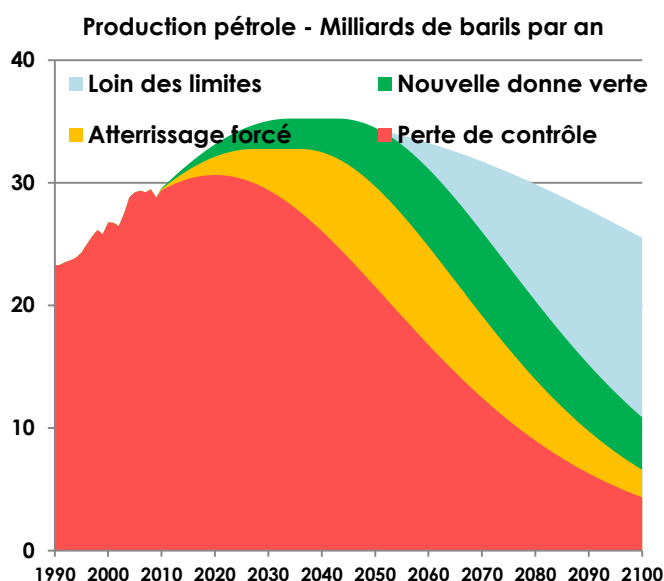
L'outil de scénarisation quantifié que nous utilisons se distingue par son approche volontairement **physique** : tous les objets modélisés sont des flux énergétiques exprimés en unités physiques (J, kWh, tonnes-équivalent-pétrole) et non en unités pécuniaires. Baptisé « Rogeautilo » en hommage à feu Bernard Rogeaux, ancien membre de la section R&D d'EDF, **l'outil permet de modéliser de façon explicite le système énergétique : c'est-à-dire tout ce qui produit, transforme, transporte, distribue et consomme de l'énergie** (sous sa forme primaire – gaz, pétrole, charbon, uranium, soleil... – ou finale – chaleur, électricité, carburants liquides ou gazeux). Demande, offre et conversion de l'énergie sont traitées de façon indépendante.

L'approche physique de la démarche de modélisation permet de respecter la 1^{ère} loi de la thermodynamique : **les flux d'énergie sont suivis de la production jusqu'à la consommation, en tenant compte des rendements des différentes filières** (par exemple, les centrales thermoélectriques n'ont qu'un rendement compris entre 30 et 40%). **Il n'y a pas dans Rogeautilo de bouclage par les prix** qui ferait miraculeusement augmenter l'offre d'énergie parce que les consommateurs seraient prêts à payer plus cher leur approvisionnement. Il en résulte qu'en fin de scénarisation, l'utilisateur peut avoir mis en exergue une situation dite de « Mes » (= *missing energy supply*) : l'offre énergétique ne permet pas de satisfaire les souhaits de la demande énergétique, à scénario de conversion donné.

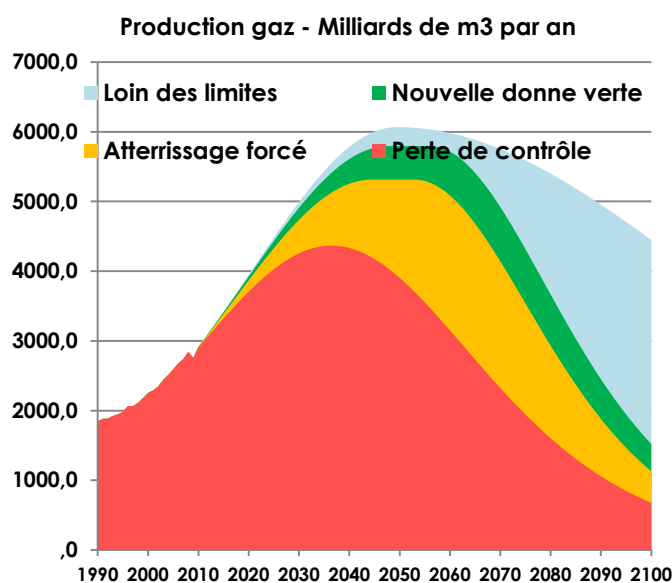
Les scénarios réalisés avec Rogeautilo sont de périmètre mondial et d'horizon temporel 2100. Le lecteur pourra se reporter à l'annexe du présent document pour une plus ample description de la description sectorielle de Rogeautilo.

Principaux résultats

Offre en énergies fossiles



En termes de production des énergies fossiles (pétrole, gaz et charbon), nous modélisons des courbes de production par des courbes de Hubbert pour prendre en compte le caractère fini de ces ressources : ainsi les scénarios se distinguent principalement quant à leurs hypothèses sur les réserves ultimes, c'est-à-dire les ressources accessibles qui seront exploitées compte tenu des conditions économiques et technologiques en vigueur⁵. On trouvera en annexe les hypothèses chiffrées des réserves fossiles pour les 3 vecteurs.



En ce qui concerne le pétrole et le gaz, nous avons pris un jeu d'hypothèses très larges pour les réserves ultimes (du simple au double). Il est cependant remarquable que des pics se produisent avant la moitié du siècle (entre 2020 et 2034 pour le pétrole, entre 2036 et 2050 pour le gaz, voir figures ci-contre). Dans les scénarios à droite de notre cartographie des futurs, « Atterrissage forcé » et « Nouvelle donne verte », les pics sont plus doux (ils sont suivis d'un plateau de 10 ans) : en effet, nous avons imaginé que la capacité des hommes à s'organiser collectivement conduirait à des allures de production moins abrupts.

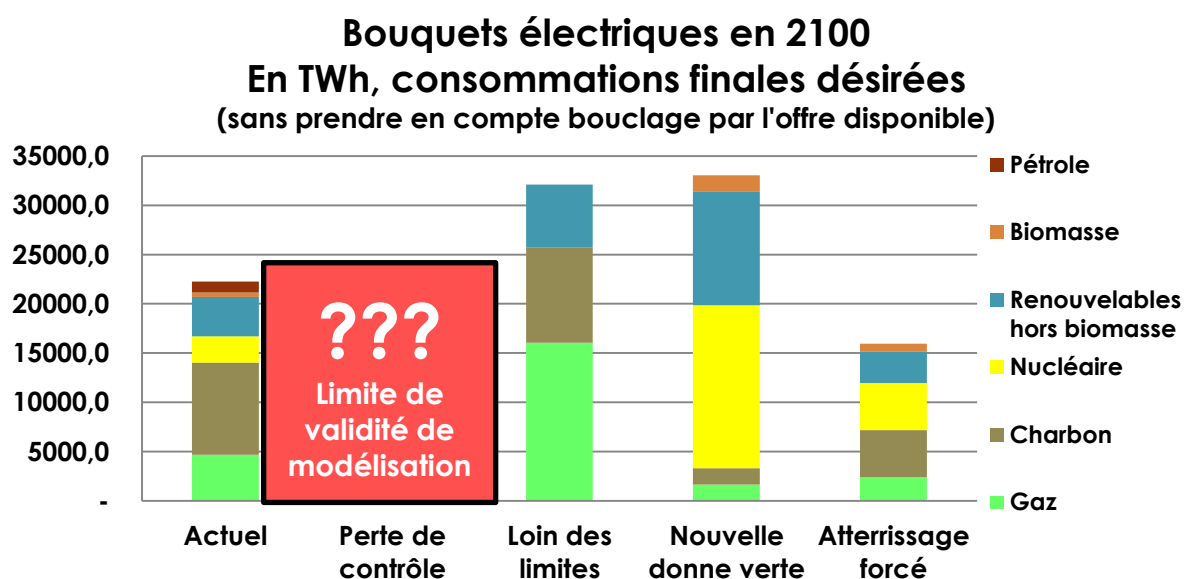
⁵ Plus exactement, les réserves ultimes sont les réserves qui ont été, qui sont et qui seront exploitées par l'homme (cette nomenclature prend donc en compte les conditions technico-économiques d'exploitation).

Bouquets électriques diversifiés

Les caractéristiques des différents quadrants mènent à 4 bouquets électriques contrastés : dans un cas comme « **Loin de limites** », alors que les émissions de CO₂ ne sont pas minimisées, **c'est le gaz qui prend la plus grande part de l'électricité produite, qui par ailleurs a augmenté de 22 000 à plus de 30 000 TWh**. En effet, dans ce quadrant les investissements vont principalement dans les sources d'électricité peu intenses en capital : le nucléaire est ainsi évincé du mix, mais aussi le charbon qui y prend aujourd'hui une part prépondérante (42%). **Le charbon a ainsi une part paradoxalement identique dans « Loin des limites » et « Atterrissage forcé », 30%**, mais pour des raisons différentes : dans le premier cas parce qu'il a été évincé par le gaz, et dans le second cas par le nucléaire. **Dans le scénario « Nouvelle donne verte », il est encore présent malgré un souci généralisé de réduire les émissions de CO₂ dans ce quadrant : cela est possible parce que nous avons imaginé que les centrales thermiques à flamme étaient équipées de dispositifs de capture du CO₂.**

La part des énergies renouvelables s'expliquent différemment dans les différents scénarios : **dans « Loin des limites », cette source regroupe principalement les centrales hydroélectriques** qui ont vu leur nombre doubler (ce qui est crédible au vu des sites techniquement disponibles aujourd'hui), tandis que **dans les scénarios « Nouvelle donne verte » et « Atterrissage forcé », il s'agit de l'hydroélectricité combinée avec des sources intermittentes comme le photovoltaïque et l'énergie éolienne**, car dans ces quadrants il est légitime de penser que les investissements dans les réseaux ont rendu possible une pénétration significative de ces sources variables (à hauteur de 20% dans « Nouvelle donne verte », hors hydroélectricité).

Enfin, le scénario « Perte de contrôle » n'est pas pertinent en termes d'électricité, car on se situe dans un zone de limite de validité pour notre modélisation : en effet, dans un scénario où les sources d'énergie sont massivement réappropriées localement (éolienne au fond du jardin, micro hydraulique au fil de l'eau, mais aussi alternateur diesel dans le garage), une notion telle que le réseau électrique n'a plus de pertinence et la majeure partie des flux électriques échappent de fait à notre outil de modélisation qui représente les vecteurs énergétiques échangés entre individus.



4 possibilités pour la mobilité passager de demain

En termes d'équipement en voitures de la population, notre modélisation laisse entrevoir 4 futurs extrêmement contrastés : en effet, dans le scénario « Perte de contrôle » nous avons imaginé que les véhicules étaient progressivement abandonnés (vieillesse et non-renouvellement de la flotte, fin de l'étalement urbain et raccourcissement des trajets parcourus) ; en totale opposition, le scénario « Loin des limites » fait état de taux d'équipement et de distances parcourues en véhicules particuliers de 2100 qui sont la généralisation des niveaux actuels dans le monde occidental.

		Valeur présente	2100			
			Perte de contrôle	Loin des limites	Nouvelle donne verte	Atterrissage forcé
Taux de motorisation	Véhicules pour 1000 habitants	130	??? Limite de validité de modélisation	500	300	150
Distances parcourues	km	15 000		20 000	15 000	5 000
Consommation unitaire	L / 100 km	11		7.0	2.5	4
Vecteur de motorisation	% de la flotte	1% électrique, le reste en liquides		Constant, env. 1% électrique	1/3 électrique, 1/3 liquides, 1/3 gaz	1/5 électrique, le reste en liquides
TOTAL demande énergie finale	Gtep	1.25		5.9	0.6	0.2

On peut ainsi atteindre un facteur 10 à 30 entre les demandes en énergie finale du scénario « Loin des limites » et celles des scénarios « Nouvelle donne verte » et « Atterrissage forcé », pour des raisons différentes : dans « Nouvelle donne verte », d'énormes économies d'énergie sont permises par une efficacité accrue des véhicules (consommation unitaire en forte baisse et hybridation de la flotte avec de l'électricité et du méthane), tandis que dans « Atterrissage forcé », c'est principalement la sobriété qui permet de réduire la demande en énergie (moins de voitures par habitant, moins de kilomètres parcourus).

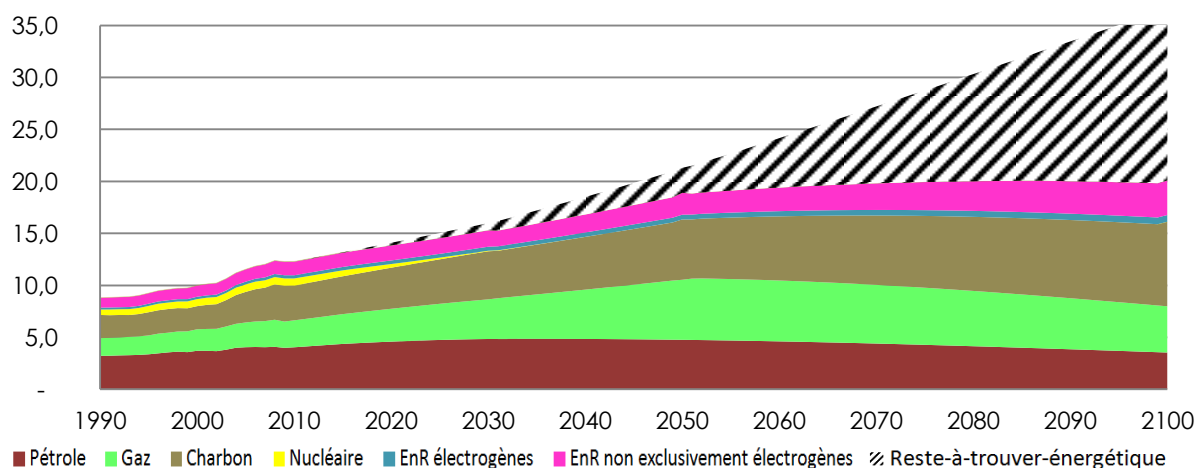
Dans une vision « Loin de limites », pas d'équilibre énergétique possible

Le graphique suivant présente de façon synthétique le fruit de la modélisation d'un scénario : la comparaison entre l'énergie finale demandée d'une part (ce qui découle des souhaits sociaux des habitants : nombre de voitures, de km parcourus, volume d'électricité demandée, etc.), et l'énergie primaire disponible (qui découle d'hypothèses faites sur les volumes d'hydrocarbures extraits, le nombre de centrales etc.). La comparaison est faisable en convertissant l'énergie finale en énergie primaire, une fois faites des hypothèses sur les bouquets énergétiques et les rendements de conversion.

La zone hachurée sur le graphique est un « Mes » (= *missing energy supply*), c'est-à-dire la différence entre les souhaits de la demande énergétique, une fois exprimés en énergie primaire, et l'offre qui peut être effectivement réalisée : dans notre scénario « Loin des limites », les souhaits de la population ne peuvent pas être satisfaits par l'offre énergétique. En effet, malgré des hypothèses très optimistes sur les réserves de pétrole et de gaz, une pénurie de ces 2 vecteurs énergétiques se ferait sentir de façon significative en quelques décennies.

Au vu de cette **profonde incohérence entre ce que demandent les consommateurs d'une part, et ce que peuvent mettre en regard les producteurs d'autre part**, il est évident que ce scénario, « Loin des limites », n'est pas crédible : en effet, une situation de Mes important ne saurait être viable plus de quelques années. La demande, comme l'offre, rattrapés par la réalité physique, rebasculeront dans un autre quadrant de notre cartographie des futurs possibles. Bien malin qui saura lequel...

"Loin des limites" : approvisionnement énergétique mondial et reste-à-trouver énergétique Gtep



Conclusion

L'approche des 4 quadrants que nous avons mise en pratique permet en quelque sorte une « approche quantique » de la prospective, comme si elle était sous forme de superposition de futurs possibles. En mettant en exergue les contrastes entre 4 mondes ayant leur propre cohérence, **une telle démarche éclaire les choix collectifs** qui peuvent ou doivent être pris en termes énergétiques. Ainsi, **l'approche exploratoire que nous avons menée dans le scénario « Loin des limites » a montré que, fautes d'anticipation, une grave crise des carburants liquides était à prévoir**. A l'inverse, un scénario comme « Nouvelle donne verte » a été développé avec un souci normatif : il montre qu'il **serait possible de conduire une transition du système énergétique pour limiter la concentration du CO₂ dans l'atmosphère à 500 ppm en 2100**, sans pour autant faire trop œuvre de sobriété comme dans « Atterrissage forcé ».

Annexes

Détails sur la scénarisation sectorielle dans Rogeaulito

La scénarisation se fait en « silo », en traitant de façon indépendante :

- La demande, pilotée par les souhaits des citoyens ou de leurs institutions représentatives, les élus. Les déterminants de la demande sont par exemple : l'évolution du nombre d'habitants et leurs aspirations en termes de mètres carrés de logements, de bureaux et de voitures. Viennent ensuite des notions de bouquets énergétiques de cette demande finale (à quoi roulent les voitures, comment on chauffe les bâtiments, ou encore quelles efficacités pour ces installations) ;
- L'offre, pilotée par des contraintes physiques : combien de pétrole, de charbon et de gaz dans le sol, quelles formes prendront leurs courbes d'extraction, combien de champs de colza sont cultivés pour les agrocarburants, combien avons-nous de centrales électriques hydrauliques, nucléaires, éoliennes ou encore de panneaux photovoltaïques ;
- La conversion, qui traitent principalement de problèmes d'allocation : quelles parts relatives pour charbon, pétrole, gaz, nucléaire et énergies renouvelables dans notre production d'électricité, de chaleur et de carburants ; par ailleurs on règle dans ce module les aspects relatifs aux rendements énergétiques des filières.

Les hypothèses sur les réserves ultimes des ressources fossiles

		Perte de contrôle	Loin des limites	Nouvelle donne verte	Atterrissage forcé
Pétrole	Gb	3 000	6 000	4 000	3 500
Gaz	bcm	350 000	800 000	500 000	450 000
Charbon	Mtce	2 000 000	10 000 000	1 100 000	2 600 000

Les hypothèses sur la demande dans le secteur des bâtiments

Demande en énergie finale, électricité spécifique et chauffage, indépendamment du vecteur choisi : chauffage au gaz, au fioul ou électrique.

		Valeur présente	2100			
			Perte de contrôle	Loin des limites	Nouvelle donne verte	Atterrissage forcé
Surface résidentielle	<i>m²/cap</i>	26	10	40	30	20
Consommation unitaire	<i>kWh/m²</i>	138	138	115	35	70
Surface tertiaire	<i>m²/cap</i>	13	0	15	13	5
Consommation unitaire	<i>kWh/m²</i>	92	92	80	92	92
TOTAL demande énergie finale	<i>Gtep</i>	2.8	1.2	5.1	2.0	1.6