

# MOOC CLIMAT

Causes et enjeux du changement climatique



## SEMAINE 4 : LA REDUCTION DES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE

*Ce document contient les transcriptions textuelles des vidéos proposées dans la partie « Évaluer les conditions technologiques » de la semaine 4 du MOOC « Causes et enjeux du changement climatique ». Ce n'est donc pas un cours écrit au sens propre du terme ; le choix des mots, l'articulation des idées et l'absence de chapitrage sont propres aux interventions orales des auteurs.*

*Élaborer des chemins technologiques souhaitables, plausibles et soutenables*

**Nadia MAÏZI**

*Professeur – MINES ParisTech*

Donc pour construire un futur qui soit compatible avec l'objectif de 2°C, il faut réduire les émissions de gaz à effet de serre qui peuvent être vues comme un fardeau que l'on devrait se répartir.

- C'est le cadre par exemple dans lequel le protocole de Kyoto a été élaboré, cet accord climatique qui a été ratifié, mis en œuvre on va dire plus tôt en 2005 pour la première fois, le 16 février 2005.
- Donc, ce protocole a été élaboré sur le principe suivant : seuls les pays du Nord devaient se répartir ce fardeau, les pays en développement en étant exonérés.
- Et la période du protocole allait de 1990 jusqu'à un horizon glissant de 2008 à 2012.

Ce protocole n'a sans doute pas eu le succès escompté en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre, mais sa mise en œuvre a permis de réfléchir à un certain nombre de questions clefs par rapport aux processus d'engagement adoptés sur lesquels il est intéressant que nous revenions.

- Alors, tout d'abord il s'agissait d'arbitrer la meilleure façon de partager le fardeau, deux options étaient envisageables :
  - Tout d'abord l'option dite *bottom-up*, où chacun des pays va proposer sur la base d'engagements volontaires ses propres niveaux de réduction.
  - A contrario, l'option *top-down*, consiste à assigner par le haut des objectifs de baisse des émissions qui sont ensuite déclinés sur l'ensemble des pays émetteurs.
- Le protocole de Kyoto s'est donc établi dans cette vision *top-down*, fortement soutenue par l'Europe qui y associait une idée de gouvernance climatique.
- À la difficulté de la mesure des gaz à effet de serre que l'on a pu évoquer, s'ajoute la difficulté de mettre en place dans ce genre d'accord des sanctions dans le cas de non-respect des engagements lorsque le cadre est contraignant.
- ⇒ D'ailleurs, dans les textes, en général, le mot sanction n'est pas adopté car il remettrait en cause la souveraineté des pays signataires.
- Il existe dans le protocole de Kyoto des mécanismes de coercition mais qui n'ont pas empêché certains pays comme le Canada de largement dépasser ces limites d'émissions et de choisir de quitter le protocole sans aucune contrepartie ou encore d'autres pays comme le Japon et la Nouvelle-Zélande, eux, sont partis du protocole à la fin de la première phase pour ne pas subir d'éventuelles pénalités lors de la seconde phase.
- Donc, en troisième question par rapport à cet accord, c'est l'année de référence qui a pu permettre à certains pays, connaissant des bouleversements économiques et politiques, de se retrouver bien en deçà du niveau d'émissions qu'ils avaient lors de l'année de référence (1990), comme par exemple la Russie.
- Donc aujourd'hui, c'est dans une logique de partage du fardeau également que vont s'inscrire les prochaines négociations de Paris dans le prolongement d'un processus entamé à Copenhague.

Alors, nous, nous avons voulu, une fois encore, essayer de comprendre comment ces gouvernances climatiques pouvaient être étudiées grâce à de la mise en œuvre d'un modèle qui permet de regarder les trajectoires sur le long terme.

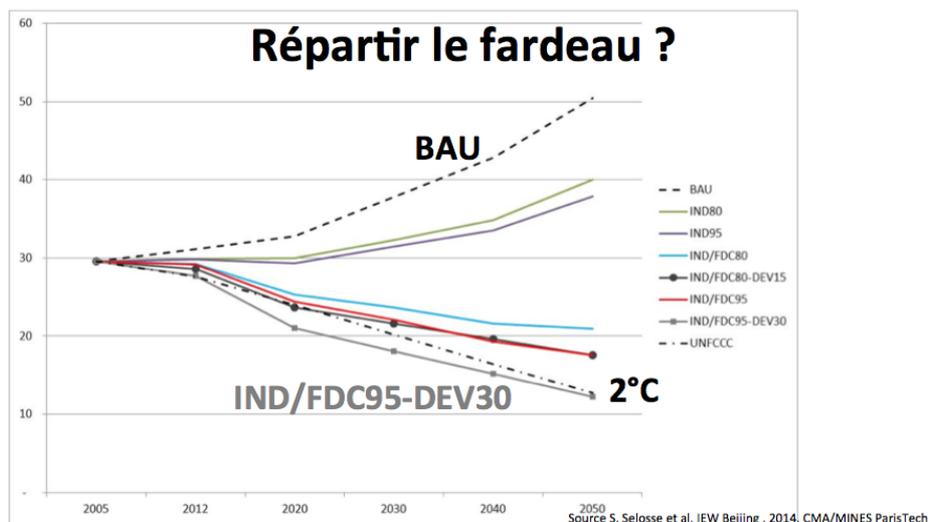
Donc ces trajectoires, nous allons en retenir simplement deux :

- Celles qui permettent effectivement d'être compatibles avec l'objectif de 2°C.

⇒ Donc il y a une courbe grise tout en bas qui représente un engagement des pays industrialisés et des pays émergents à hauteur de 95 % de réduction de leurs émissions par rapport au niveau de 2005 et un engagement des pays en développement de 30 % par rapport à leur *business as usual*, c'est-à-dire leur scénario de référence.

- Et nous avons une autre courbe très proche qui est la courbe sur laquelle nous avons mis une contrainte de 2°C, c'est-à-dire qu'on a imaginé qu'il y aurait une gouvernance climatique imposant par le haut cette contrainte.

⇒ Deux courbes très proches mais qui sans doute reflètent des réalités très différentes.



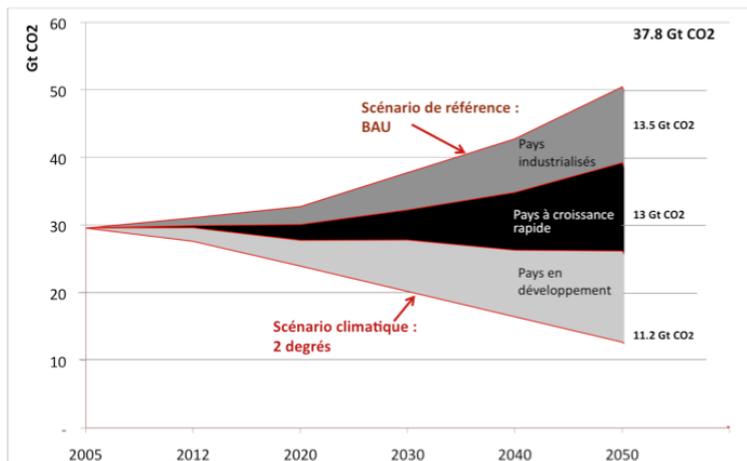
Alors maintenant, pour pouvoir comprendre comment on va ouvrir les boîtes, il va falloir que nous fassions un petit effort pour comprendre les modèles sous-jacents à l'élaboration de ces courbes.

- Pour réaliser ces visions du futur, il existe un certain nombre d'approches qui ont été développées à partir des années 50 et que je vais très rapidement vous décrire.
  - Donc l'approche dite de *storytelling* dans laquelle, en fait, on raconte une histoire - souvent à laquelle on croit -, et on l'étaye avec des descriptions, des visions, ce sont des dires d'experts.
  - Ensuite vous avez une deuxième approche pour construire les scénarios du futur qui est celle dite du *back-casting*, c'est-à-dire qu'on fixe un point, un objectif et on va remonter le temps avec des étapes intermédiaires pour essayer de comprendre comment, consolidant la trajectoire, on arrive à évaluer les mesures pour atteindre ce fameux objectif.
  - La troisième famille d'approche prospective repose sur des modèles, des modèles d'offres et de demandes, et ce sont sur ce type d'approche que nous avons développé nos trajectoires.

- ⇒ On va rentrer un petit peu plus maintenant dans le modèle en regardant ce à quoi nous faisons référence.
- Et bien nous, nous partons d'une demande qui nous est donnée sur un horizon de long terme et notre modèle va évaluer l'offre technologique qui lui sera associée dans le meilleur compromis coûts/efficacité.
- Donc, la décision d'investissement, l'hypothèse principale est qu'elle repose sur un planificateur, c'est-à-dire qu'elle est centralisée, c'est-à-dire que c'est totalement irréaliste dans le monde concurrentiel dans lequel nous vivons.
- Cependant, ce qui est intéressant, et comme on a un paradigme de modélisation qui repose sur une optimisation, c'est que les résultats que produit ce modèle indiquent ce que l'on pourrait envisager dans le meilleur des cas en donnant donc une borne inférieure en termes de système productif et du coup, en termes d'émissions.
- ⇒ Oui parce que j'ai oublié de vous préciser que l'on se restreint au système énergétique avec les hypothèses qu'il correspond à une très grande part des émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique réalisées aujourd'hui sur la planète.
- Donc, une force encore de ce modèle, c'est de représenter suivant le schéma que je ne détaillerai pas mais qui est assez explicite, l'ensemble des technologies d'offres pour satisfaire des demandes d'usage en énergie et qu'on va donc pouvoir tenir compte de compétition et de substitution dans une très grande cohérence.
- Donc dans les trajectoires que nous avons élaborées dans le graphe que je vous repropose, ces trajectoires, derrière chacune d'entre elles, on va retrouver un système de production d'énergie associé à une zone particulière puisque notre modèle décline le monde en seize régions.

Maintenant qu'on a un peu ouvert la boîte noire, on va pouvoir aller plus loin et reprendre notre discussion sur la compréhension de ce partage du fardeau.

- Donc là, simplement le fardeau c'est ce qui correspond à la différence entre le scénario de référence (rappelez-vous, le *business as usual*) qui est donné en rouge en haut de la figure, et puis notre scénario climatique qui va être, dans le premier cas que nous étudions, celui où on est dans une vision *top down* de partage du fardeau.
- ⇒ Donc on a mis une contrainte et le scénario rouge de 2°C nous permet d'arriver à l'objectif climatique.
- On a un fardeau de 37,8 gigatonnes de CO<sub>2</sub> à se répartir et on a décliné cette répartition - puisque notre modèle permet d'ouvrir la boîte -, en trois grandes régions, les pays industrialisés, les pays à croissance rapide et les pays en développement.

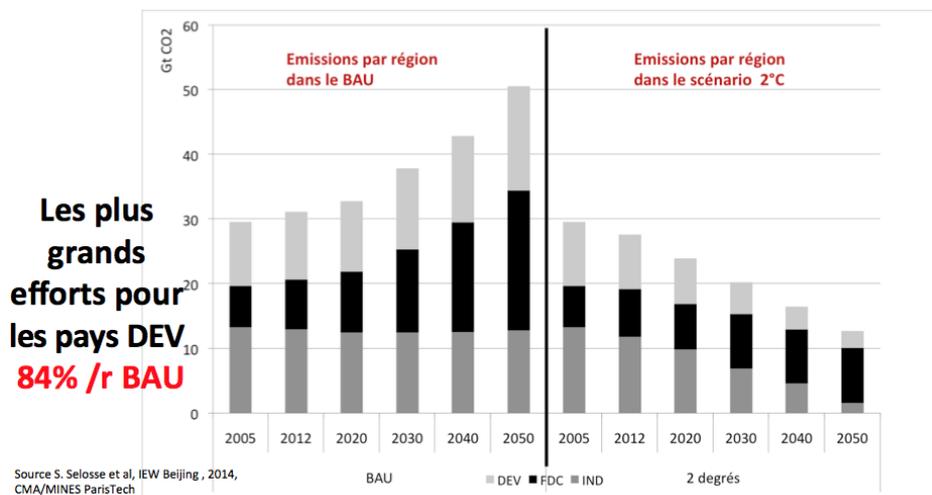


Source S. Selosse et al, IEW Beijing, 2014, CMA/MINES ParisTech

Vision  
« top-down »  
du partage  
du fardeau

➤ À première vue, on pourrait penser que la répartition est équitable puisque l'on trouve des quantités, des niveaux d'émissions à peu près équivalents mais c'est une analyse assez superficielle et il faut aller un tout petit peu plus loin en regardant sur ce graphique ce que cela représente réellement en termes d'évolution par rapport au *business as usual* des différentes zones.

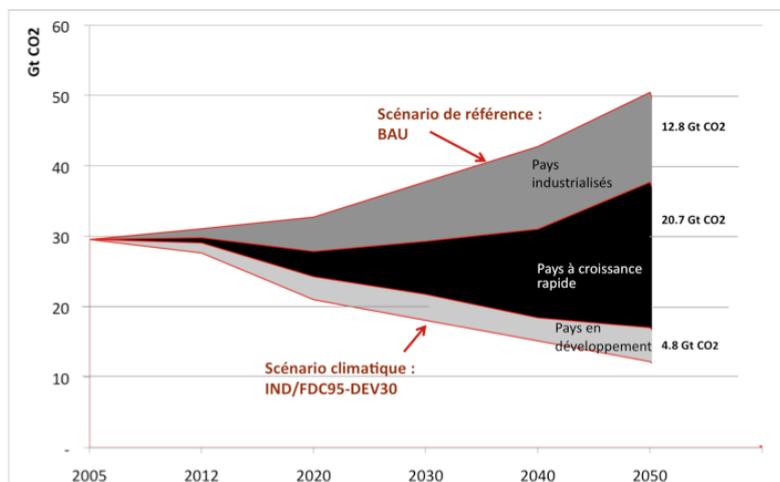
⇒ Donc à gauche, vous avez les scénarios qui déclinent le *business as usual* pour les trois grandes régions, et à droite, vous voyez, les efforts que chacune des régions a dû consentir pour diminuer et arriver au scénario climatique.



⇒ On voit bien sûr que c'est la région correspondant aux pays en développement qui en pâtit le plus, puisqu'elle doit consentir une réduction de 84 % par rapport à son *business as usual*.

➤ Ce résultat est logique. Ce n'est pas que le modèle n'est pas juste et ne s'embarrasse pas des spécificités régionales, c'est qu'il fonctionne sur un principe où il va tout d'abord agir là où le compromis coûts/efficacité est le plus rentable.

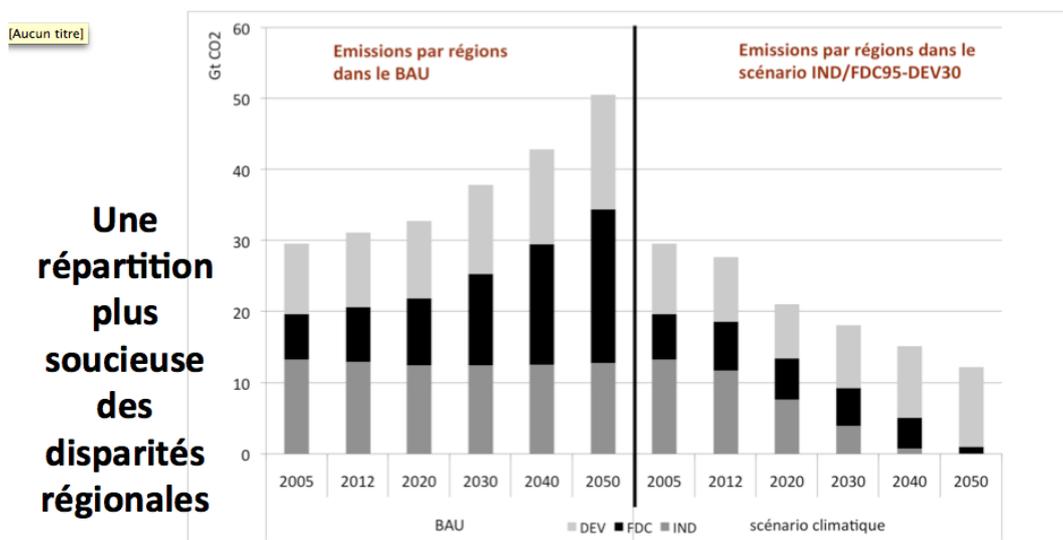
- ⇒ Et c'est donc sur les pays en développement que, rationnellement, les efforts devraient se porter, puisque c'est là où ça coûterait le moins cher et où ça serait le plus efficace.
- Alors, si on repart maintenant rapidement dans une vision *bottom-up* du partage du fardeau, donc la vision inverse où là les pays s'engagent de manière volontaire, on voit que la répartition se fait tout naturellement très différemment et qu'en bas, les pays en développement ont une part de fardeau bien moins importante.



Vision  
« bottom-up »  
du partage du  
fardeau

Source S. Selosse et al, IEW Beijing, 2014, CMA/MINES ParisTech

- ⇒ Alors je reprécise juste que le nouveau scénario climatique n'est plus de 2°C mais rappelez-vous celui de la courbe grise que l'on avait vue au tout début.
- Et pour finir sur cette analyse, on se rend compte que dans cette vision, bien sûr, la répartition va devenir beaucoup plus soucieuse des disparités régionales puisque pareil, si on regarde une comparaison entre le *business as usual* par région et notre nouveau scénario climatique, on se rend compte que l'effort consenti ne pèse plus que sur les pays en développement qui participent un petit peu, mais essentiellement sur les pays émergents et sur les pays industrialisés.



Une  
répartition  
plus  
soucieuse  
des  
disparités  
régionales

Source S. Selosse et al, IEW Beijing, 2014, CMA/MINES ParisTech

- Dans cette logique, nous avons considéré que les pays émergents n'étaient pas dans une vision de responsabilité historique, faute de quoi ils n'auraient pas proposé à la même hauteur que les pays industrialisés ce niveau de 95 % de réduction des émissions.
- ⇒ Donc c'est cette approche aujourd'hui, celle de l'engagement volontaire, qui va présider aux prochaines négociations lors de la COP 21 qui se tiendra à Paris en décembre.

# Déterminer les engagements compatibles avec l'objectif de 2 ° C

**Nadia MAÏZI**

*Professeur – MINES ParisTech*

Suivre une trajectoire dont les concentrations diminuent au cours du temps, on l'a compris, c'est quelque part en vertu de ce que nous avons présenté et des travaux du GIEC, inverser la tendance.

Si l'on reprend les courbes de concentrations qui ont été publiées par le GIEC dans le dernier Résumé pour Décideurs, on constate que toutes les estimations vont placer le niveau d'élévation de la température à l'horizon 2100 au-dessus du seuil maximal de 2 °C.

⇒ Cela implique donc que, pour construire un futur qui serait compatible avec notre objectif de 2 °C, il faut absolument réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Pour cela, on imagine que des engagements des Etats seraient nécessaires avec des chiffres à l'appui et des objectifs de stabilisation dont la définition et l'ambition sont au cœur de la négociation climat aujourd'hui.

Mais, il existe quelques écueils et en particulier un certain manque de lisibilité qui conduit à des difficultés pour quantifier ce à quoi conduiraient certains engagements.

➤ Alors, nous avons réalisé une étude au sein de MINES Paris Tech, au centre de mathématiques appliqués pour comprendre, dans un exemple particulier, ce à quoi auraient mené les engagements pris après la 15e conférence sur le climat, dite COP 15, qui a eu lieu à Copenhague.

Donc, regardons, si vous le voulez bien, le tableau que nous avons dressé et qui correspond à ce qui s'est passé fin janvier 2010.

➤ Certains pays se sont engagés sur des niveaux d'émission à l'horizon 2020, et ces engagements devaient être intégrés et ont été intégrés d'ailleurs dans l'accord dit de Copenhague.

⇒ Alors, ils se sont regroupés en trois grands groupes, donc voyez les acronymes :

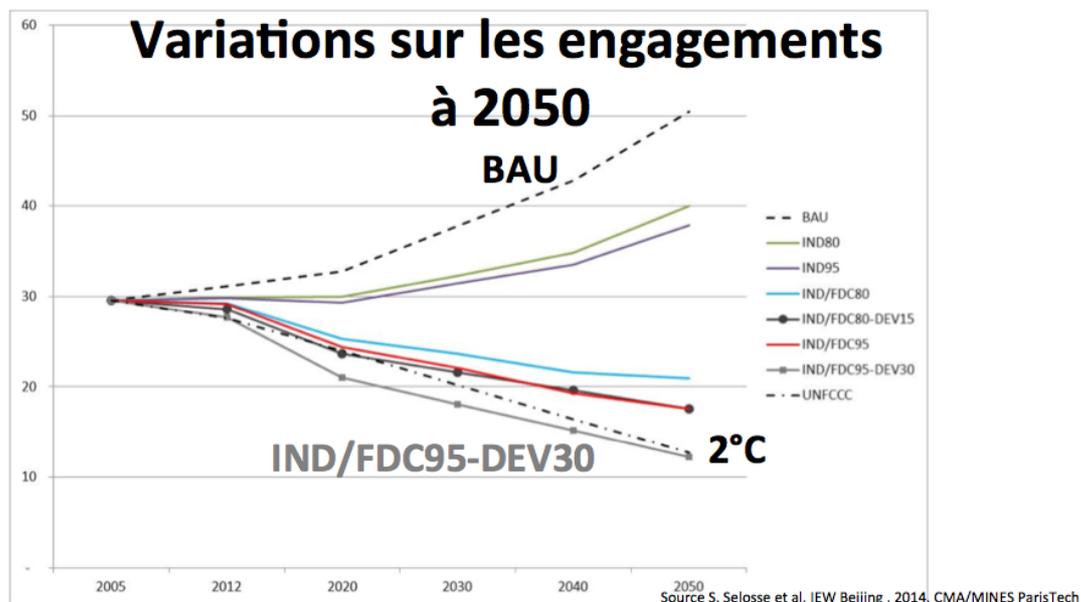
- Australie, Nouvelle-Zélande, d'abord Canada, pardon, Japon, Etats-Unis, Europe de l'Ouest, Europe de l'Est ;
- Ensuite les pays dits à croissance rapide : Chine et Inde ;

- Et puis, les pays en développement, donc l'Union soviétique, ex-URSS, les pays d'Afrique du sud, du Brésil, le Mexique et la Corée du Sud.
- Donc, ces pays proposent des engagements, et ce que je voudrais que l'on relève dans ce tableau, ce sont ceux qui correspondent à la première colonne. Donc ils donnent leur niveau de réduction 2020.
- ⇒ On pourrait avoir tendance à tout de suite avoir envie de les comparer entre eux, mais attention. Regardons d'abord par rapport à quelles années de référence sont donné ces engagements.
- ⇒ On voit qu'il y a trois années qui sont référencées : 90 pour certains, 2000 pour d'autres et 2005 encore pour d'autres pays.
- ⇒ Et puis ensuite, il y a un choix de mesures qui est donné pour quantifier l'objectif. Certaines mesures sont données directement au niveau de réduction d'émissions alors que d'autres sont exprimées en intensité carbone, c'est-à-dire le rapport entre le PIB (le Produit Intérieur Brut) du pays et les émissions de gaz à effet de serre associées à ce PIB.
- Donc, on comprend dès lors que l'on a un indicateur de ce type-là, que si on veut parler du futur, et bien il va falloir déjà anticiper ce que sera le PIB dans le futur et il va y avoir donc de grandes difficultés à quantifier les émissions de carbone relativement à ce type d'indicateurs.
- Alors, ce que nous avons fait, c'est que nous avons traduit dans la dernière colonne ce que signifieraient ces objectifs réellement et ce que vous voyez, c'est qu'en fait, pour le groupe des pays industrialisés, on a des chiffres négatifs ce qui prouve qu'il y a un réel engagement de réduction d'émissions de gaz à effet de serre, tandis ce que pour les pays à croissance rapide et les pays en développement, le ratio de réduction est donné en positif.
- ⇒ Cela signifie que ces pays ne réduisent pas directement leurs émissions mais réduisent le rythme de croissance de leurs émissions, ce qui constitue malgré tout, ne l'oublions pas, un gros effort.
- Alors, ce que nous avons réalisé par la suite, c'est de prolonger en fait ces engagements à un horizon 2050 pour comprendre ce qui se passerait si, au-delà, des échéances 2020 - 2025 - 2030, données par les différents pays aujourd'hui dans les négociations, on allait jusqu'à 2050, et à quelles conditions l'objectif climatique pourrait être atteint.

Donc on a imaginé en fait deux types d'engagements :

- Soit un engagement par pays, par grands groupes de pays, donc ces groupes de pays, ce sont trois groupes que nous avons répertoriés :

- IND, pays industrialisés ;
  - FDC (*Face Developing Countries*), les pays à croissance rapide ;
  - et DEV, les pays en développement.
- Et vous avez indiqué sur cette figure, les différents pays qui les constituent. Je vous laisse regarder attentivement ces trois grands groupes.
- Ils sont indiqués de cette façon-là parce qu'ils ont des logiques qui peuvent être comparées en termes de croissance et d'ambitions de développement.
- Donc, si je reviens à l'étude que nous avons réalisée, nous sommes partis d'une référence que l'on appelle le *business as usual*, qui est donc la courbe tendancielle qui indique ce qui pourrait se passer en termes d'émissions de gaz à effet de serre si l'on ne faisait rien.



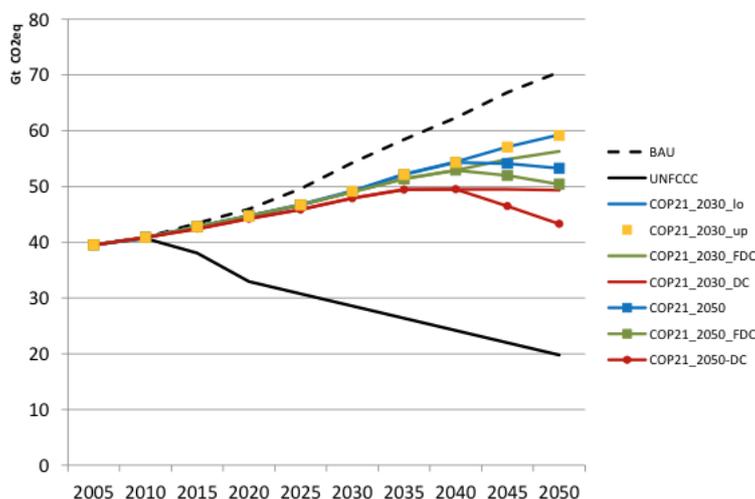
- ⇒ Alors, des gaz à effet de serre, à ce stade, il faut quand même que je vous précise que nous n'avons considéré que le dioxyde de carbone, CO<sub>2</sub>, émis par les systèmes énergétiques de l'ensemble des pays. Pourquoi ?
- Parce que je vous indiquerai le modèle sous-jacent pour la construction de ces trajectoires et surtout, parce que ces niveaux d'émissions de dioxyde de carbone représentent 80 % des émissions de gaz à effet de serre au niveau mondial et le système énergétique et la combustion des énergies en général représente 80 % des émissions de CO<sub>2</sub> annuelles.
- ⇒ Donc il est intéressant de se concentrer sur ces éléments.

Donc revenons sur cette courbe en pointillés qui est notre scénario de référence.

- C'est donc par rapport à ce scénario de référence qu'il faut prendre un ensemble de mesures pour réduire les émissions, et donc les courbes qui sont dessous indiquent à combien chacun des pays s'est engagé.
- Donc, une chose à remarquer à ce stade, chaque pays s'engage à un niveau de pourcentages indiqué par le nombre qui est accolé à la trajectoire qui représente les hypothèses, par exemple, si je prends la trajectoire rouge qui s'intitule « IND/FDC95 », cela signifie que pays industrialisés et pays émergents s'engagent à réduire leurs émissions de 95 % par rapport au niveau où elles étaient en 2005.
- ⇒ Donc, ce qu'on peut constater, c'est que c'est très ambitieux, ça va bien au-delà de tous les engagements pris en termes de délais et en termes de niveau, et malgré tout, on n'est pas encore à l'objectif.
- La conclusion, c'est qu'il faut que tous s'engagent et même s'ils s'engagent de manière un peu différenciée.
- ⇒ Parce que quand on fait s'engager les pays en développement dans notre hypothèse, en réalité, on leur demande simplement un engagement par rapport à leur propre *business as usual* c'est-à-dire leur courbe de trajectoire à l'horizon 2050.
- Donc, la courbe qui nous intéressera maintenant, puisqu'on cherche à atteindre ce 2°C qui est tout en bas de notre graphique, c'est celle qui s'intitule « IND/FDC95-DEV30 » qui veut dire qu'à 95 % les pays industrialisés et développés mais également les pays en voie de développement à 30 % par rapport à leur *business as usual* et maintenant, on comprend que sans un effort intense de l'ensemble des pays, on ne pourra pas être compatible avec cet objectif de 2°C.
- ⇒ Donc cette courbe traduit des engagements propres par pays.
- Maintenant, vous voyez juste au-dessus une petite courbe en pointillés qui s'intitulent 2°C. Qu'est-ce que c'est qu'il y a derrière ?
- En fait on a fabriqué cette trajectoire en mettant un objectif de 2°C sur notre système global, et donc, comme on a un modèle qui fonctionne en sous-jacent, le modèle fait en général ce qu'on lui demande de faire, il a satisfait la contrainte et il est allé jusqu'à ces 2°C.
- ⇒ Donc on a deux courbes, une qui est obtenue par des engagements par pays, et l'autre qui est obtenue par une contrainte globale.
- ⇒ Ces deux courbes sont très proches, malgré tout on comprendra dans la suite qu'il va falloir aller plus loin dans la réflexion pour savoir ce qu'il y a caché derrière ces deux courbes.

Alors, aujourd'hui, nous sommes dans une configuration, comme le montre les courbes que je vous fais apparaître à l'écran, où les engagements sont très loin de ce que nous avons pu simuler dans une étude de laboratoire de recherche puisqu'ici nous avons reconstitué, avec les propositions qui sont arrivées en préparation de la COP 21, ce que les différents pays se sont engagés à réaliser, qui est à l'horizon 2025 pour les États-Unis par exemple qui s'engagent à réduire de 26 à 28 % leurs émissions par rapport au niveau de 2005, qui est à 2030 pour l'Europe qui s'engage à réduire ses émissions à 40 % par rapport au niveau de 90.

Scénarios	EUROPE	USA	CHINA	Other
COP21_2030_lo	40% by 2030 Peak 2030	26% by 2025 Peak 2025	Peak 2030	No
COP21_2030_up	40% by 2030 Peak 2030	28% by 2025 Peak 2025	Peak 2030	No
COP21_2030_FDC	40% by 2030 Peak 2030	28% by 2025 Peak 2025	Peak 2030	Peak 2030 in India
COP21_2030_DC	40% by 2030 Peak 2030	28% by 2025 Peak 2025	Peak 2030	Peak 2030 in developing countries
COP21_2050	40% by 2030 80% by 2050	28% by 2025 80% by 2050	Peak 2030	No
COP21_2050_FDC	40% by 2030 80% by 2050	28% by 2025 80% by 2050	Peak 2030	Peak 2030 in India
COP21_2050_DC	40% by 2030 80% by 2050	28% by 2025 80% by 2050	Peak 2030	Peak 2030 in developing countries



Source S. Selosse et al, COP20 Lima, 2015, CMA/MINES ParisTech

Encore une fois, nous avons prolongé cette courbe à 2050, et vous constatez que, dans le meilleur des cas, il y a une très grande distance entre la courbe noire dite de l'objectif climatique et la première courbe rouge où tout le monde s'est engagé dans la fourchette haute de ce que les différents pays ont pu proposer.

# Comprendre ce que sont les coûts des politiques climatiques

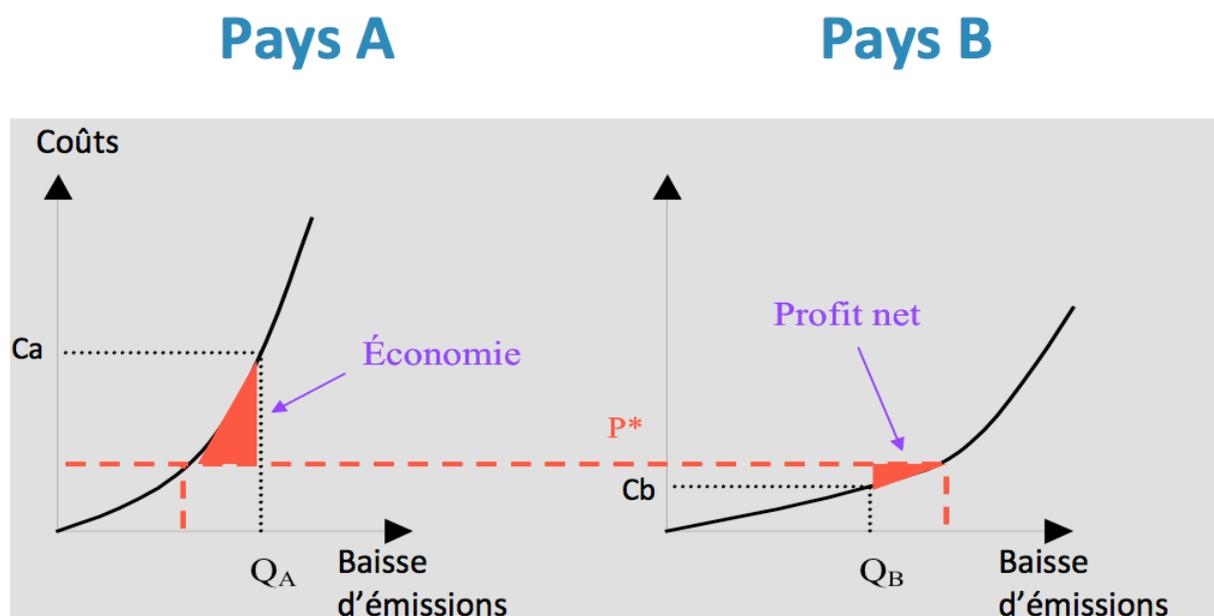
Jean-Charles HOURCADE

Directeur de recherche – CNRS

Nous allons essayer dans cette vidéo de comprendre ce que sont les coûts des politiques climatiques, car après tout, c'est bien ça qui retient de les lancer, surtout dans un contexte difficile fait de chômage et de sous-emploi.

Ici, les économistes avancent une idée très simple : il faut qu'il y ait un prix du carbone qui permette à chacun d'abattre les émissions jusqu'au niveau où le coût marginal d'abattement est égal à ce prix.

⇒ Pour comprendre ce qui se passe, regardons le graphique que vous avez en face de vous.



- Il y a deux pays qui veulent abattre les mêmes émissions, la même quantité, sauf que l'un, le pays B paraît plus, entre guillemets, doué que l'autre : sa courbe de coût d'abattement monte moins vite que le premier.
  - Si chacun veut faire séparément le même objectif, on voit que le pays A va le faire avec un coût  $C_a$  bien supérieur au coût  $C_b$  du second.
- ⇒ C'est très inefficace et pour être efficace, il faudrait que chacun mène un effort jusqu'au moment où leur coût marginal sera égal à ce qui est marqué ici, avec le symbole  $P^*$ .

➤ Si on fait ça, le pays A va abattre moins d'émissions, le pays B va en abattre plus, au total, le niveau de performance environnementale sera le même et vous voyez que le pays A aura économisé le triangle rouge sur la gauche et que le pays B va exporter des émissions et va gagner le triangle rouge que vous avez sur la droite.

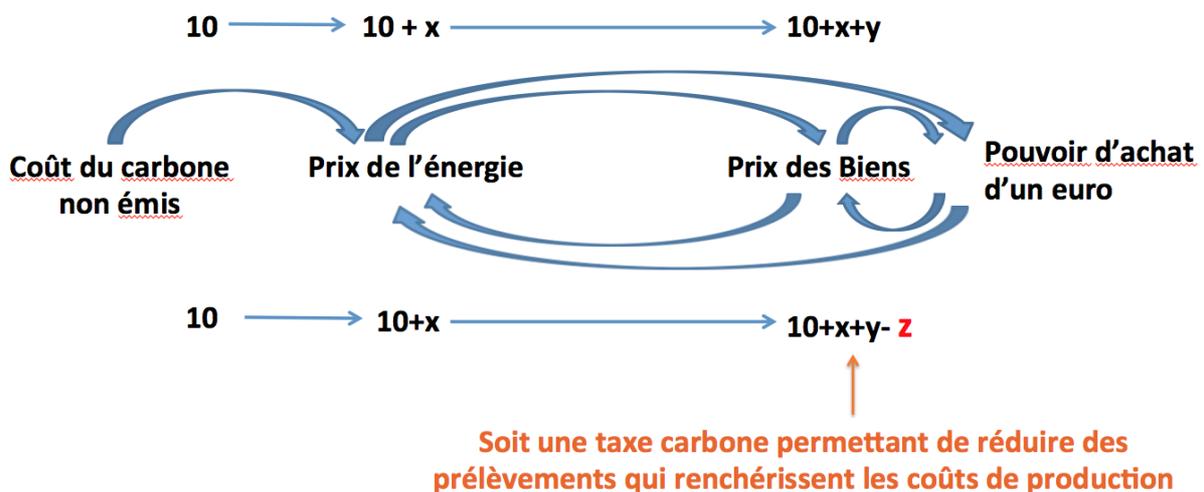
⇒ Au total, donc un argument simple et de bon sens, qui fait que chacun gagne à avoir un prix unique du carbone.

Bien sûr, comme toute idée simple, elle est vite compliquée par le monde réel. Elle est compliquée parce que, dans le monde réel, il y a des secteurs économiques qui sont plus ou moins affectés par une taxe carbone parce qu'ils consomment plus ou moins d'énergie et surtout que certains sont en amont des autres donc je dirais peuvent plus facilement leur faire payer la facture.

➤ Par exemple dans des pays où les systèmes fiscaux sont très différents, mais aussi des pays très inégaux en revenus et il faut savoir que les dépenses énergétiques des ménages à bas revenus représentent une part bien plus importante de leur budget que cette même part pour les ménages aisés et surtout, bien sûr, le fait que 50 € la tonne de carbone pèse bien plus sur le bien-être de quelqu'un qui gagne 2 € par jour que quelqu'un qui gagne 2000 € par jour.

⇒ Tous ceci sont des arguments simples à comprendre mais il y en a un dernier tout aussi important pour les politiques économiques, peu tangible mais qui est celui de la propagation des coûts entre secteurs industriels, entre ménages et entre industries, ménages et pouvoirs publics/Etat.

➤ Pour comprendre ce qui se passe, on peut regarder ce graphique. Tout serait simple si avec un coût du carbone de 10, chacun allait payer 10.



⇒ Ce n'est pas ce qui se passe, parce que d'abord ce coût de 10 va devenir 10 plus quelque chose (ici, j'ai mis X), quand il sera facturée par l'entreprise énergétique, mais surtout, cette somme-là va se propager aux secteurs producteurs d'acier, producteurs de ciment,

et à tous les secteurs en aval, ce qui fait qu'au total l'ensemble des coûts de production de ce que vous achetez va se renchérir (ici j'ai mis une somme Y).

- ⇒ Il faut savoir que dans les simulations que l'on a, cet effet de multiplication, de propagation peut aboutir à une facture qu'il là, par exemple si l'on part de 10 peut aller jusqu'à 15 ou 20.
- ⇒ Ceci va peser sur le pouvoir d'achat des ménages, ils ne le savent pas à priori, aussi affecter la compétitivité des entreprises.
- La seule façon de bloquer cet effet de propagation, c'est qu'en même temps qu'on taxe quelqu'un de 10, les entreprises de 10, on les détaxe de 10, c'est-à-dire qu'on réduise les impôts qui affectent les coûts de production.
- Dans la majorité des études qui sont conduites sur le sujet dans les pays européens ou aux États-Unis, la meilleure façon de le faire bien sûr c'est de baisser les charges sociales pour bloquer ça.
- ⇒ Et donc on voit que ça a un rôle très important puisque c'est un problème de débat social sur la façon dont on utilise les produits de la taxe.
- Maintenant, en termes de politique énergétique, de politique climatique, qu'est-ce qu'on peut retenir de ça pour l'analyse des trois outils qui nous sont proposés principalement : les taxes, les quotas et les normes techniques ?
- ⇒ Bien sûr dans la réalité ces trois outils sont utilisés d'une façon mixte, mais il est intéressant de savoir ce que chacun fait. Quels sont les avantages et les inconvénients de chacun d'entre eux.
- Quand on regarde les taxes carbone, c'est simple, un pays prend une taxe, il la recycle en interne, il n'y a pas de transferts internationaux, on sait ce qu'on paye, le niveau de la taxe mais on n'est pas très certains du résultat en termes d'abattement, il faut le savoir.
- Autre avantage, c'est que si cette taxe est bien recyclée, on peut espérer avoir des coûts sociaux aux coûts techniques.
- Avec les quotas, c'est différent. Avec les quotas, on a des transferts internationaux, entre pays, entre les pays dans lesquels le coût d'abattement est plus élevé en direction des pays dans lesquels le coût d'abattement est le plus faible (en général dans le monde moderne c'est plutôt en direction des pays en développement).
- Mais ça pose un problème très important, c'est comment on va allouer les quotas entre la Chine, entre l'Inde, l'Europe et les États-Unis ? Quelle règle va être adoptée et sera reconnue comme équitable ?
- ⇒ Il y a un vrai défi qui n'a jamais été résolu au protocole de Kyoto et depuis.

- Avec ce système certes, on connaît à priori le résultat, sauf que l'on est incertain sur le coût que l'on va supporter en dernière instance et il y a toujours une incertitude sur le fait qu'un pays confronté à un coût qu'il n'a pas attendu respecte sa signature et il y a surtout un dernier problème, en raison des risques de propagation que l'on vient de voir, il y a des coûts sociaux supérieurs aux coûts techniques s'il y a allocation gratuite des permis.
- ⇒ Il faut savoir bien sûr que le résultat est différent s'il y en a des occasions aux enchères parce qu'à ce moment-là on peut prendre l'argent pour baisser des taxes qui retombent sur le coût de production mais à ce moment-là, pourquoi passer par un système si compliqué et non pas directement passer par une fiscalité carbone ?
- Et puis il y a enfin des normes ensuite. Les normes techniques dont on ne connaît pas les coûts, ce sont des sortes de coûts cachés, on ne les annonce pas, mais ces coûts existent et eux aussi se propagent, eux aussi les consommateurs et les travailleurs vont les payer.
- Et l'efficacité des normes est réelle mais moins importante que ce qu'il n'y paraît. Pourquoi ?
- ⇒ À cause de ce que l'on appelle les effets rebond.
- ⇒ Et finalement, c'est très simple, vous me donnez un véhicule plus efficace, 2 litres au 100, je risque de rouler plus en voiture parce que la facture, mes dépenses en essence vont baisser. Vous me donnez des moteurs plus efficaces pour les camions, et bien plus de marchandises vont être transportées par le camion plutôt que par le rail ou par les voies d'eau.
- ⇒ Donc pour bloquer cet effet rebond, on est bien forcés de les compenser par un renchérissement des prix de l'énergie.

Alors maintenant bien sûr, voilà pour ce qui concerne les prix du carbone, sauf que dans la dynamique des émissions, et donc des politiques qu'il faut mener pour les réduire sur le long terme, il n'y a pas que le prix du carbone qui compte.

- La mobilité automobile par exemple, ce n'est pas seulement un problème de prix de l'essence, c'est un problème de prix de l'immobilier qui pousse les gens à s'excentrer par rapport aux centres urbains, ça dépend des politiques d'infrastructures qui sont menées par les villes, par les régions, par les départements.
- ⇒ Ça dépend aussi de choses si importantes que l'installation de supermarchés en périphérie des villes moyennes.
- De même, pour les énergies nouvelles et renouvelables, on sait très bien qu'elles sont très souvent intermittentes, il faut des réseaux de transmission et de distribution mais ça, ça dépend de quoi ? Pas seulement du prix du carbone, ça dépend des politiques de régulation des marchés énergétiques.

- On a la même chose pour le marché des carburants à grande échelle qui dépend du prix des terres, de la rémunération des agriculteurs.
- Et enfin et peut-être surtout, on y reviendra dans la dernière vidéo, les risques d'investissements bas carbone - parce qu'on a un prix du carbone, c'est bien, il en faut, mais ça peut très bien ne pas suffire à déclencher les investissements -, face aux brusques variations des prix du pétrole et des prix des devises qui peuvent annuler très rapidement l'impact de toute taxe carbone, même significative, il y a bien sûr aussi les incertitudes technologiques.

Qu'est-ce qu'on peut tirer de tout ça ? Et bien c'est que le coût économique et social d'une politique climatique n'est pas seulement affaire de coûts techniques, il dépend de la façon dont la hausse des prix de l'énergie est accompagnée par des politiques fiscales et financières, est accompagnée par des politiques de transport, d'urbanisme, d'aménagement du territoire.

- ⇒ Ce qu'il faut retenir, c'est important pour les autres vidéos, pour la suite de cette séquence, c'est que ces mesures ne sont pas adoptées uniquement pour des raisons climatiques mais bel et bien en fonction d'autres enjeux de développement et de politique économique.

# Rechercher les conditions technologiques d'une transition énergétique intelligente

**Nadia MAÏZI**

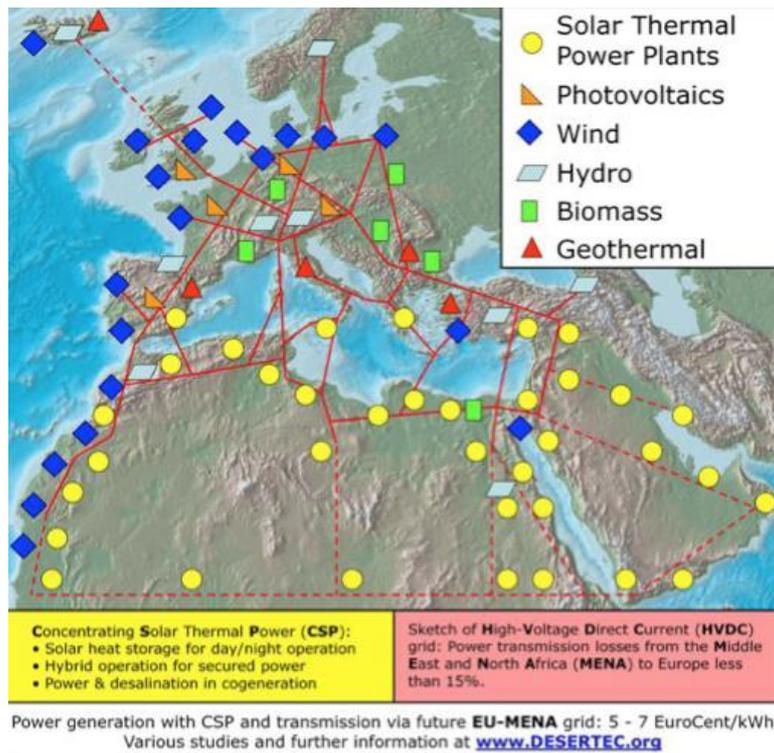
*Professeur – MINES ParisTech*

On va aborder maintenant les questions liées aux potentialités que les technologies peuvent apporter aux réductions d'émissions de gaz à effet de serre tant du côté de l'offre, que du côté de la demande.

- Et pour illustrer mon propos, je vous propose de nous concentrer sur le secteur électrique qui est un secteur emblématique de l'accélération du réel pour trois raisons qui nécessitent sa mutation.
    - Alors, ces raisons, c'est tout d'abord l'explosion de la demande dans l'électricité qui préfigure des investissements gigantesques.
    - De plus, ce secteur est un des premiers concernés par la raréfaction des ressources fossiles puisqu'il est extrêmement émetteur.
- ⇒ C'est le premier secteur contributeur en termes de production électrique, il pèse pour 45 % des émissions de gaz à effet de serre mondiales.

Donc à travers l'étude d'un petit exemple, je voudrais vous montrer ce que seraient les conditions d'une transition intelligente de ce secteur, c'est-à-dire une transition qui nous permette à la fois de nous adapter aux changements que je viens d'exposer tout en conservant les qualités de fourniture d'électricité que nous connaissons aujourd'hui, en rationalisant les investissements à venir et en étant le moins émissifs possible.

- ⇒ On peut voir une multitude de recommandations émerger pour sous-tendre cet objectif.
- Alors tout d'abord, si on regarde ce transparent illustré par la vision DESERTEC, qui n'a pas abouti, de déploiement d'énergie intermittente sur l'Europe du Sud et le Maghreb, on peut avoir comme type de solution proposée des solutions en génération.



- Donc ces sources renouvelables mais aussi le nucléaire que l'on peut présenter comme une technologie zéro émission ou des technologies de capture et de séquestration de dioxyde de carbone.
  - On peut aussi proposer des solutions qui sont dites d'instruments et de mesures, c'est-à-dire des instruments de marché : marché du carbone, quotas, taxes, prix, subventions, des engagements nationaux, des lois d'orientation de la politique énergétique, des lois qui inscrivent le Facteur 4 - c'est-à-dire qui disent que, pour nous la France, nous diviserons par quatre nos émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050 par rapport au niveau de 90, ou alors des engagements internationaux comme ceux qui seront discutés dans les conférences du climat à venir -.
  - Et puis il y a également des bouquets techniques qui sont proposés, qui vont être des solutions dites d'efficacité énergétique, de *smartgrids*, *smartwater*, c'est-à-dire réseaux électriques intelligents, villes intelligentes, villes durables, mobilité électrique, biocarburants, réseaux centralisés, décentralisés.
- En fait, toutes ces propositions constituent un imbroglio de solutions, de recommandations techniques et politiques qu'il s'agit de démêler.
- Et pour cela, il est nécessaire de les prendre en compte dans des visions de long terme qui permettent de réconcilier des échelles de temps et d'espace, de prendre en compte l'aspect systémique de ces solutions, de savoir si l'on n'est pas en train d'appuyer sur un morceau du matelas pneumatique faisant remonter tout le reste, et d'effectuer des arbitrages en conséquence.

Alors pour cela, ce que je vous propose, c'est d'explorer le cas de l'île de la Réunion qui est une île qui souhaite être 100 % renouvelable en 2030 et qui présente un contexte tout à fait idéal pour le développement de ces ressources.

- Donc, si l'on considère des modèles qui permettent de décliner le long terme, des modèles d'offre technologique, on peut par exemple proposer le scénario que vous avez sous les yeux et qui permet d'exploiter les ressources naturelles abondantes venant de l'océan : donc des ressources sur la conversion thermique des océans, les vents (de l'énergie éolienne), le soleil de l'énergie (à base de panneaux photovoltaïques).



- ⇒ Donc on voit que ce scénario, qui était gris au début, c'est-à-dire basé sur des ressources fossiles, essentiellement de l'importation de charbon et des ressources pétrolières, va se verdier et devenir de plus en plus vertueux.

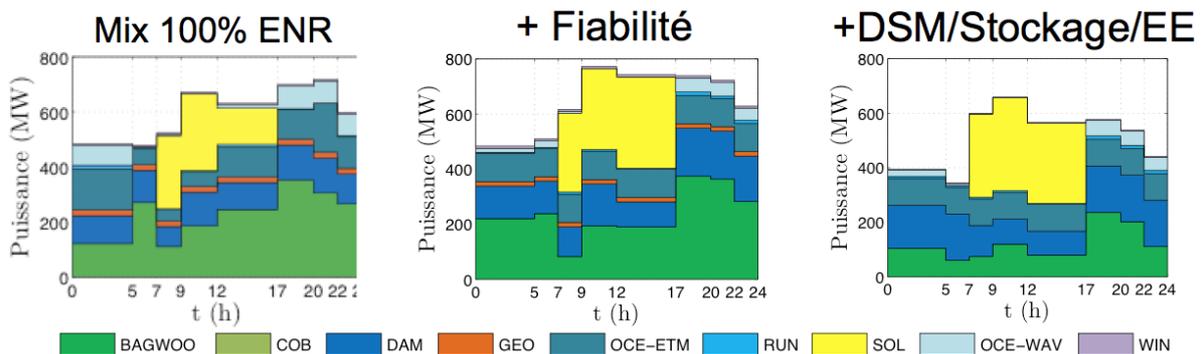
Je ne le commente pas plus, parce que ce que je voudrais discuter maintenant, c'est une fois que ces scénarios sont élaborés, sont proposés, quelles sont les conditions techniques de leurs réalisations ?

- Il faut aller plus loin pour comprendre que les systèmes sous-tendus vont être des systèmes complexes comme par exemple le système électrique et que ce système, ce que l'on souhaite, c'est qu'il soit fiable, c'est-à-dire que l'on puisse rétablir sa stabilité après une fluctuation de charge via le contrôle de ces réserves et ces qualités techniques permettent d'envisager en fait des questions de très court terme alors que les visions et les scénarios proposés dans les différentes publications sont des scénarios de très long terme.
- Donc pour adresser ces questions, et bien nous avons développé un indicateur de fiabilité qui va permettre d'éviter les événements, tel que celui illustré par la photographie, dans

lequel vous vous rappelez sans doute, on représente le black-out de l'Europe créé à partir d'incidents en Italie, en 2003.

- Donc, ces combinaisons techniques, ce qui est intéressant c'est maintenant d'essayer de les évaluer avec les éléments scientifiques dont nous disposons.

Alors, ce que je vous propose, c'est simplement de vous raconter ce qu'il y a sur ces trois schémas et qui représente la correspondance de notre scénario de 2030 - 100 % renouvelable à la Réunion, avec ce qui se passerait pendant une journée type d'été si le mix de production d'électricité tel qu'on la conçu était installé.



Un jour d'été type en 2030 à La Réunion

**Perte en fiabilité**

**ENR ≥ 50%**

**ENR ≥ 50%**

↗ **% capacités : 9.4**

↘ **% capacités : 6**

Source : S. Bouckaert et al, Energy Procedia, 2014, CMA/MINES ParisTech

- Alors complètement à gauche, vous avez un mix qui est 100 % d'énergies renouvelables et on constate, quand on mesure avec nos indicateurs de fiabilité, que l'on va avoir une perte en fiabilité, c'est-à-dire qu'on n'aura pas assez de réserves pour pouvoir assurer l'équilibre offre/demande à chaque instant.
- ⇒ C'est traduit d'ailleurs par la pénétration du jaune : on voit que pendant certaines heures de la journée, on a beaucoup de ressources photovoltaïques et ce que l'on sait, c'est que cette ressource photovoltaïque, elle est fatale, c'est-à-dire que si on ne l'utilise pas tout de suite et bien on la perd.
- Alors, on a ajouté des conditions qui sont des conditions de fiabilité et on a contraint notre scénario pour que la fiabilité dont on dispose aujourd'hui en référence à notre scénario 2010, et bien ce soit la même sur l'horizon prospectif de déploiement de ce scénario 100 % renouvelable.
- ⇒ Là, on arrive à des résultats très intéressants parce qu'il faut savoir qu'à la Réunion aujourd'hui, le régulateur, c'est-à-dire celui qui opère le réseau qui n'est autre qu'EDF d'ailleurs, limite à 30 % la pénétration de renouvelable d'origine intermittente, c'est-à-dire provenant du vent ou du soleil, à chaque instant, en puissance appelée.

- ⇒ Or, nous ce que nous avons pu prouver, c'est que l'on peut faire pénétrer cette énergie intermittente à hauteur de 50 % sous réserve que l'on installe des capacités supplémentaires de 9,4 % par rapport au scénario 100 % ENR qui ne donnait aucune condition technique à sa réalisation.
- Si on va un peu plus loin, on regarde la dernière figure, et là on se rend compte que si on ajoute en plus du côté de la demande des efforts, c'est-à-dire que l'on réalise ce que l'on appelle du *demand side management*, de l'effacement (les consommateurs s'effacent pendant certaines périodes, acceptent que certains usages qu'ils font de l'électricité soient décalés), si l'on ajoute du stockage et si l'on ajoute de l'efficacité énergétique (c'est-à-dire si l'on prend des technologies extrêmement efficaces pour réaliser notre production d'électricité), alors le résultat devient encore plus intéressant, c'est-à-dire que non seulement la pénétration des énergies intermittentes peut aller au-delà de 50 %, mais en plus on n'est même pas obligés d'augmenter les capacités supplémentaires, au contraire, on va diminuer ces capacités installées.

Donc tout ça pour dire que si on considère les enjeux du réchauffement climatique et que l'on cherche à déployer des systèmes qui soient adaptés dans une transition intelligente à réduire ces émissions, et bien on peut également constituer des systèmes techniques qui ont de très bonne qualités par rapport à celles que l'on a aujourd'hui et ne pas simplement déployer sans prendre en compte ces contraintes des solutions parce qu'elles sont vendables ou médiatiques.

Donc, pour conclure, ce que je vous proposerais, c'est de suivre le principe énoncé par Pascal sur le monde politique : « travaillons donc à bien penser, c'est le principe de la politique. ». Sans quoi toutes les transitions sont envisageables et surtout, prenons en compte la place du citoyen qui va être sans doute déterminante pour arbitrer dans le futur ces enjeux autour du climat.