



Séminaire Scénarios d'une France "renouvelable"

■ De 0 à 100 % renouvelable en France, oui mais à quelle condition ?

Nadia Maïzi, 28 Janvier 2021

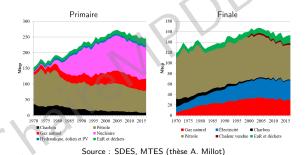
Centre de Mathématiques Appliquées MINES ParisTech/PSL Research University
Chaire Modélisation prospective au service du développement durable

Le contexte français



ou ce que l'on peut percevoir des débats politiques à venir

- compétitivité et indépendance énergétique
- développement du programme électro-nucléaire pour le secteur électrique





Le temps de la prospective . . . le temps du politique





... pour alimenter la préparation de la PPI 2013

le rapport devait fournir une analyse du mix énergétique à l'horizon 2050

- La lettre de mission est publiée le 19 Octobre 2011
- Publication officielle des résultats du rapport le 13 Février 2013
 - 8 recommandations dont 3 sur le nucléaire

3

atholique Georges Lemaître Centre for Earth and Climate Research

MINES *

Monsieur le Président de la République Française Palais de l'Élysée 55, rue du faubourg Saint-Honoré 75008 Paris France

Louvain-la-Neuve, le 31 août 2018

Mister President

Among industrial countries, France has the best performances as far as carbon dioxide emissions are concerned. The Carbon intensity of France amounts to 0.1 kg per dollar, while the average value for the entire world is four times as much. The figure for the US is 0.3, for Germany 0.2 and for China 1 kg per dollar. Should all countries adopt the French energy mix, the worldwide annual carbon dioxide emissions would be divided by 4 going from 32.3 billion tons to 7.6 billion tons nearly reaching carbon neutrality and temperature stabilization. Benefiting from carbon-free electricity. France could go even further in decarbonizing its economy by moving toward electric transportation and heat production. This extraordnary performance results from the high proportion of nuclear energy in the French electricity mix.

It appears that, following the resignation of your Ecology Minister, Nicolas Hulot, and the report by Yamick d'Escatha and Laurent Collet Billon, France now has the opportunity to choose an environmentally efficient nuclear policy. With many colleagues climatologists I wish hereby to encourage you to continue in this way.

Doing this, you will appear as an efficient and real leader of the fight against global warming which the world needs and, once more, France could be leading a vital fight for humanity.

With my very distinguished consideration,

André Berger, Emeritus Professor and Senior Scientist Web: http://www.climate.be/u/berger

4



Monsieur le Professeur.

¾ J'aj bien reçu la lettre que vous avez souhaité m'adresser et je
vous en remercie vivement.

Vos analyses et réflexions sur les atouts de la France dans la lutte contre le réchauffement climatique ont retenu tout mon intérêt.

Vous connaissez en effet l'ambition que je porte de faire de la France le pays leader dans ce domaine, tant il y a urgence à agir pour notre planête. Aussi, je me félicite des performances que vous mettez en lumière s'agissant de l'intensité carbone de notre mix énergétique. Comme vous, je suis convaincu de l'importance particulière du nucléaire, en tant qu'énergie décarbonée, pour garantir un niveau d'émission de gaz à effet de serre le plus bas possible.

Déterminé à poursuivre nos efforts en la matière et à accélérer la transition mondiale vers une économie bas-carbone, je me réjouis de pouvoir compter sur votre précieux soutien.

En vous renouvelant mes remerciements, je vous prie de croire, Monsieur le Professeur, à l'assurance de mes sentiments les meilleurs.

for o'm

Emmanuel MACRON

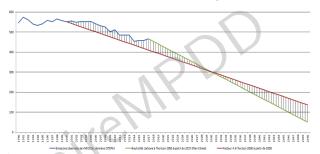
Monsieur André BERGER
Professeur émérite
Earth and Life Institute - Université catholique de Louvain
PLACE LOUIS PASTEUR 3
BOTTE LA 03.08
JUNE 14 03.08

Orientations des lois énergie climat



ou comment définir la neutralité à la française

Trajectoire souhaitée des émissions française à l'horizon 2050



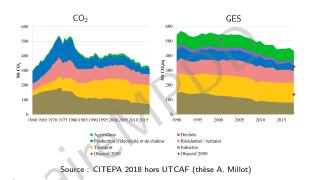
Source B. Le Hir. France Stratégie 2018

- ▶ Objectif national à 2050 qui s'inscrit dans la démarche mondiale
- Nécessité de prendre en compte tous les secteurs et tous les GES



Les sources des émissions domestiques





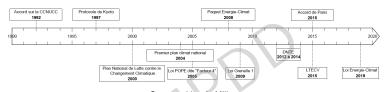
- part des émissions CO₂
 - 74% des GES en 2016
- part des émissions CO₂ énergétiques

92% des émissions CO2 ou 68% des GES en 2016

7

Objectifs environnementaux : un processus évolutif





Source : thèse A. Millot

- émissions de GES : réduction de 40% en 2030 par rapport à 1990 et zéro émissions nettes en 2050
- consommation d'énergie finale : réduction de 50% en 2050 par rapport à 2012
- consommation d'énergie fossile : réduction of 40% en 2050 par rapport à 2012
- sources d'énergies renouvelables : atteindre 33% de la consommation d'énergie finale et 40% de la production d'électricité en 2030
- nucléaire : 50% de la production électrique en 2035

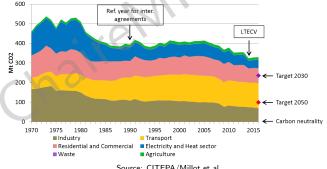
В

Une bifurcation bien timide



la tendance des émissions de CO₂

- ▶ accroissement de 4% de 2014 à 2017 (depuis la mise en place de la LTECV)
- non alignement avec les objectifs 2030 et 2050 : dans 9 et 29 ans !



Source: CITEPA/Millot et al.

Les scénarios d'un futur énergétique



doivent s'inscrire dans une démarche prospective

Notre civilisation est comparable à une voiture qui roule de plus en plus vite sur une route inconnue lorsque la nuit est tombée. Il faut que ses phares portent de plus en plus loin si l'on veut éviter la catastrophe.

Gaston Berger, 1964, Phénoménologie du temps et Prospective

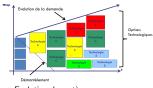


Construire l'avenir



La Prospective est tout particulièrement l'étude de **l'avenir lointain** :

- voir loin
- voir large
- analyser en profondeur
- prendre des risques
- penser à l'homme



Evolution du système énergétique

Se préparer à l'action c'est envisager à l'avance toutes les ramifications du possible P. Massé.

Des scénarios fabriqués



Storytelling Faire rêver, Effrayer

Back-casting
Partir des objectifs, remonter aux étapes intermédiaires

Modéliser Transformation entrées/sorties



Les ingrédients des scénarios

















Modes de vie



- Sources peu émissives en carbone
- Choix technologiques
- ► Efficacité énergétique
- Solutions intelligentes
- Instruments de marchés
- Choix de société
- Engagements climatiques nationaux et internationaux
- Modes de gouvernance

vecteurs d'une transition bas carbone?

une transition bas carbone



à quelle condition

scénario bas carbone explorés

- intégrant une composante renouvelable
- périmètre électrique ou énergétique

scénarios plausibles, faisables, souhaitables?

- b décrypter : modèles, approches, statut scientifique sous-jacents
- ▶ analyser : hypothèses sous-tendant les scénarios proposés
- évaluer : leur pertinence au regard d'éléments structurants incontournables



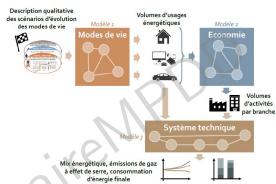
Moulins à vent $XIII^{\mathrm{eme}}$ - XIX^{eme}



modes de vie



quid des changements à venir

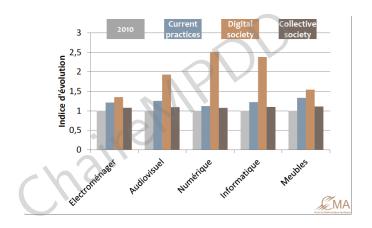


[A. Millot, R. Doudard, T. Le Gallic, F. Briens, E. Assoumou and N. Maïzi. France 2072: Lifestyles at the core of carbon neutrality challenges, In book: Limiting Global Warming to Well Below 2 C: Springer, 2018..]



Des modes de vie à la consommation en équipements

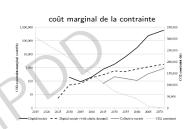


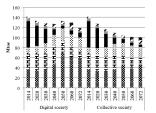


Les modes de vie leviers dans les scénarios de neutralité...

- poids du mode de vie essentiel pour atteindre la neutralité carbone
- en 2072 le coût marginal de la "société digitale" est 700 fois plus élevé que celui d'une "société collectiviste"

association entre modes de vie et certaines technologies et vecteurs: ici CCS, biomasse, vecteur électrique





• Other Hydrogen

*District heating

■Coal

■ Petrol ◆Biomass

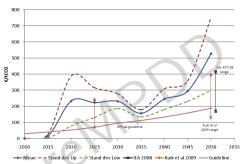
∓Gas Electricity

Energie finale objectif neutralité en 2072 et élasticité de la demande

Instruments économiques



des leviers pour la neutralité carbone



Valeurs du carbone évaluées avec TIMES-FR

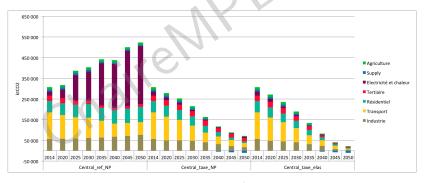
[E. Assoumou and N. Maïzi. Carbon value dynamics for France: a key driver to support mitigation pledges at country scale. Energy Policy, 39(7): 4325-4336. 2011]



Le levier de la taxe pour la neutralité carbone



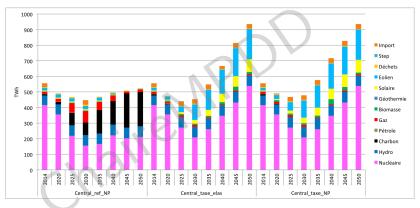
- ► Central_ref_NP : scénario de référence (absolument aucune taxe)
- Central_taxe_NP : scénario taxé selon la trajectoire de la Commission Quinet 2019
- ► Central_elas_NP : idem avec demande élastique



émissions de CO2

Le mix électrique associé

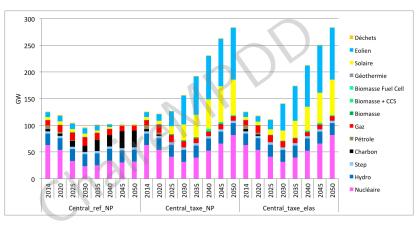




Production d'électricité

Les capacités installées





Capacités

système électrique



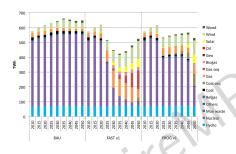
questions autour de l'intégration du renouvelable





Opération du système électrique





Production électrique taxe et contrainte en volume

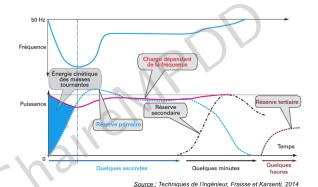
Quid de la pertinence et la plausibilité des mix de production électrique évalués via les exercices de prospective long terme



L'Europe pendant le blackout de l'Italie (28 Sept. 2003). Source: RTE.

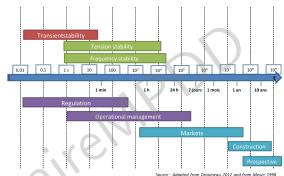
Fonctionnement du réseau face à une perturbation





Reconcilier les dynamiques de court et long terme





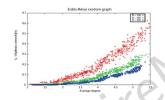
- Source : Adapted from Drouineau 2012 and from Meyer 1998
- M. Drouineau, Modélisation prospective et analyse spatio-temporelle : intégration de la dynamique du réseau électrique, MINES ParisTech PhD Thesis under N. Maïzi direction, 2011.
- S. Bouckaert, Assessing Smart Grids contribution to the energy transition with long-term scenarios (Contribution des Smart Grids à la transition énergétique: évaluation dans des scénarios long terme), MINES ParisTech PhD Thesis under N. Maïzi direction, 2013.
- V. Krakowski, Intégration des renouvelables et stratégie de développement du réseau (Renewable and network development strategies) MINES ParisTech PhD Thesis under N. Maïzi direction, 2016.

Assurer la stabilité du système électrique



i.e. sa capacité à revenir à son état initial d'équilibre suite à une fluctuation de charge

Synchronisme: Assurer la même vitesse angulaire/fréquence des unités (énergie électromagnétique) afin de disposer d'



► Inertie : Assurer le maintien de la production et de la transmission (réserve cinétique)

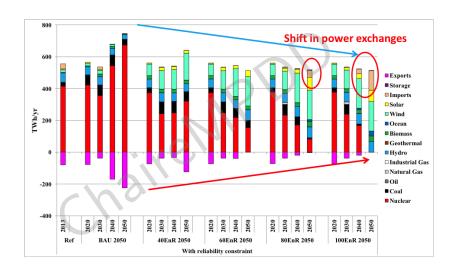


Une condition suffisante de synchronisme a été élaborée :

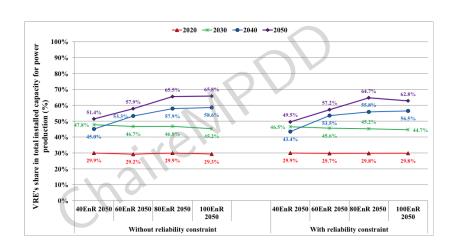
- En s'affranchissant des équations de Kirchhoff
- Par analogie entre la dynamique du système électrique et le modèle de Kuramoto qui décrit le synchronisme d'oscillateurs en interaction
- A partir de la connectivité algébrique du graphe grille 2D capturant le comportement du réseau maillé en ses rotors et générateurs

Mix électrique intégrant de 40% à 100% d'ENR

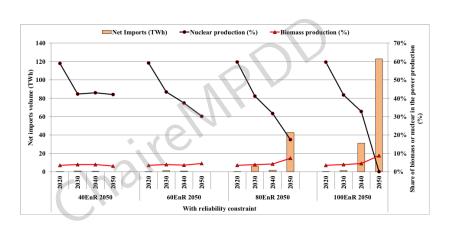




Niveau max de REV pour 40% à 100% d'ENR en Frances **

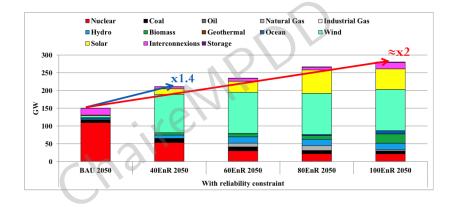


Importations induites par la pénétration massive d'ENR MINES *



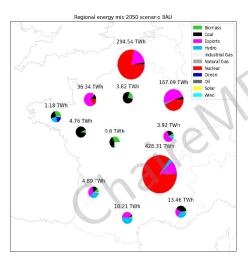
Capacités installées en 2050 pour 40% à 100% d'ENR

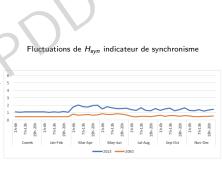




Condition de Synchronisme pour le BAU

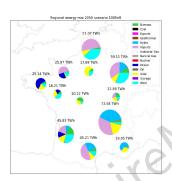


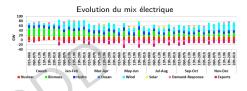




Analyse du mix électrique français 100% renouvelable









- Le scénario 100% renouvelable n'est atteint que sous réserve d'importation de biomasse.
- Le renouvelable variable repose essentiellement sur du PV et des énergies marines H_{syn} est toujours supérieur à l'unité (condition de Dörfler). Le système est
- intrinsèquement stable et il est pertinent de sommer l'ensemble des contributions cinétiques des machines tournantes
- La décentralisation est favorable au synchronisme mais défavorable à l'inertie du système électrique

Scénarios d'une France "renouvelable": de 0 à 100%



seront interrogés à la lumière

- de la flexibilité entre vecteurs énergétiques (février)
- de l'opération des systèmes (mars)
- des questions de spatialité, de réseaux, d'infrastructures (avril)
- de l'aménagement du territoire (mai)
- de la gouvernance, des régulations et des conditions institutionnelles (juin)
- des externalités sur d'autres dimensions d'un 'développement soutenable' : IT, matériaux, ... (septembre)
- des modes de vie (octobre)
- des transports (novembre)
- des coûts et de l'ingénierie des financements (décembre)

