

# L'H<sub>2</sub>ydrogène

## l'énergie de demain ?

### *Hydrogène et électricité*

Intervention de Franck Montaugé, sénateur du Gers / 30' + 5'

## L'H2 dans le système électrique national

- La Transition Ecologique et ses conséquences sur le système électrique / 2 - 10
  - Le cadre de l'action : la SNBC
  - Les scénarii de mix E étudiés
  - ... et la problématique de la **flexibilité du réseau**
- La place de l'hydrogène dans le système énergétique / 11 - 15
  - Vecteur de décarbonation de certains usages
  - Facteur possible de **flexibilité du réseau** électrique
- L'H2 dans les solutions de flexibilité / 16 – 21
- Les coûts de l'H2 / 22 – 25
- Questions ... échange
- Sources :
  - étude RTE : « Futurs énergétiques 2050 »
  - rapports du GIEC
  - ...

Remerciements à Michel CASSÉ, à la mairie de Fleurance et à son maire Ronny Guardia – Mazolleni... et à tous ceux dont Bruno Monflier qui font briller Fleurance des milles feux de la science et de la pensée rationnelle... dans le concert intellectuel et éducatif national ... qui interroge par ailleurs !

Définition de symposium «Réunion ou congrès de spécialistes, consacré à un thème scientifique particulier. »

La définition du mot m'oblige à vous dire :

- à quel titre je vais m'exprimer

et

- pour dire quoi, sur un sujet dont je ne suis pas et loin s'en faut un spécialiste.

Je vais m'exprimer en qualité de sénateur, membre de la Commission des Affaires Economiques portant un intérêt particulier pour les questions énergétiques eu égard à l'enjeu que constitue la Transition Ecologique et Energétique pour notre civilisation.

À vrai dire « la grande question politique de notre temps » à propos de laquelle devrait être décidées, déclinées et évaluées toutes nos politiques publiques, de l'échelon national à l'ensemble du monde en passant pour nous français par l'Union Européenne, c'est celle de la transition écologique qui pour moi engage le devenir de notre civilisation.

## Le cadre de l'action climat : la SNBC



Voilà le contexte de la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) pour une neutralité carbone en 2050.

Je précise et c'est important que la SNBC n'a toujours pas été actualisée et encore moins soumise à débat... Au Parlement à tout le moins.

Sa version 3 devra prendre en compte le « Fit for 55% » de l'Union Européenne : - 55% d'émission de Gaz à Effet de Serre (GES) à l'horizon 2030 par rapport aux émissions de 1990.

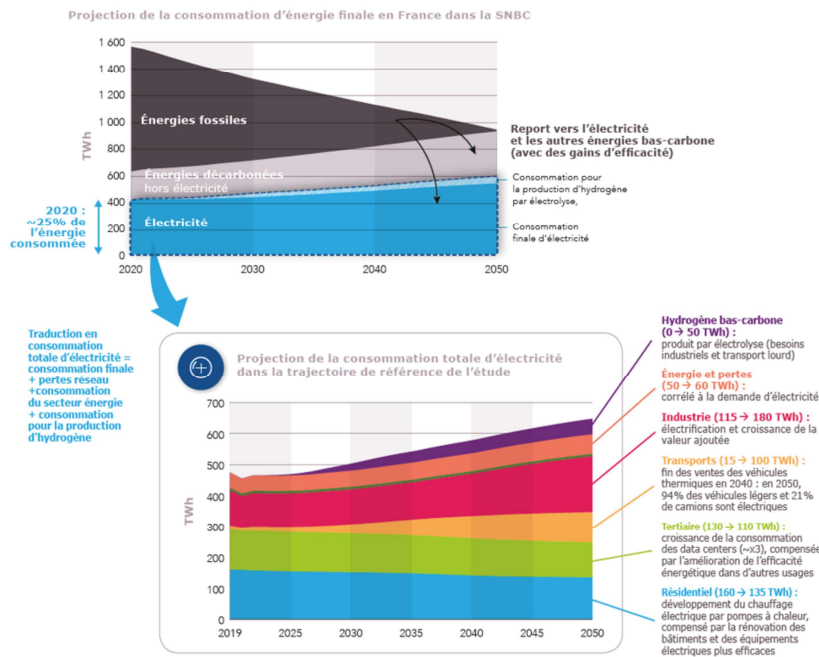
**SNBC 1** : 2015 à 2018

**SNBC 2** : 2019 – 2023 aligne les objectifs nationaux sur l'Accord de Paris et au cadre UE  
→ **2019 budget carbone** de la France établi à **442 MtCO<sub>2</sub>eq**

**SNBC 3** ou SNBC 2030 transition vers économie bas-carbone :

- Neutralité carbone en 2050
- Réduction de l'emprunte carbone de la consommation des français

**Enseignement n° 2** Évolution de la consommation d'énergie et d'électricité dans une perspective de neutralité carbone



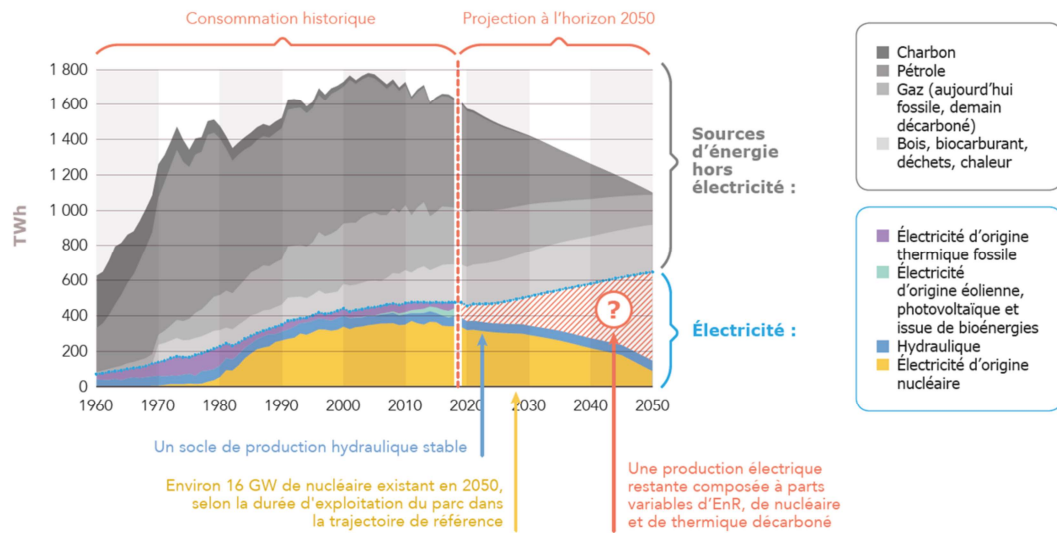
Les évolutions nécessaires de l'énergie finale consommée.

Leurs conséquences sur la consommation d'électricité des grands secteurs de l'économie française.

Dont les évolutions de la consommation d'électricité pour la **production d'hydrogène**.

## Demain, un système électrique très différent de celui d'aujourd'hui

**Figure 3** Évolution de la consommation totale d'électricité et de la consommation d'énergie finale pour les autres énergies en France

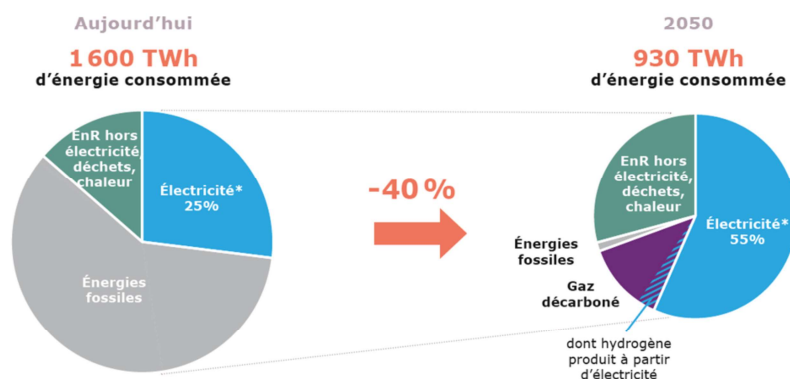


5

Le système électrique est appelé à se transformer profondément pour parvenir à cet objectif de neutralité carbone.

## La stratégie française pour l'avenir : une énergie bas-carbone et souveraine, fondée sur l'efficacité énergétique, l'électricité bas-carbone et le développement des usages de la biomasse

**Figure 2** Consommation d'énergie finale en France et dans la SNBC



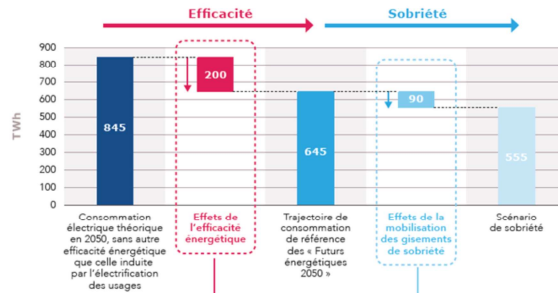
\* Consommation finale d'électricité (hors pertes, hors consommation issue du secteur de l'énergie et hors consommation pour la production d'hydrogène)  
Consommation finale d'électricité dans la trajectoire de référence de RTE = 645 TWh

6

Une énergie totale consommée qui baisse ET une part de l'électricité qui croit de 25% à 55% (645 TWh scénario de référence RTE) .

Avec une part d'hydrogène produite à partir de l'électricité... estimée à 50 TWh en 2050 soit 5%

**Enseignement n°1** Effets attendus de l'efficacité énergétique et effets potentiels de la sobriété sur le niveau de consommation (par rapport à la trajectoire de référence)



- 1 **Réduction des consommations unitaires des équipements :** électroménager, éclairage, informatique.
- 2 **Mise en œuvre de politiques publiques volontaristes :** rénovation thermique des bâtiments (doublement du rythme de rénovations), normes sur les nouveaux bâtiments (RE 2020), décret tertiaire, utilisation privilégiée des pompes à chaleur.

- 3 **Renforcement mécanique de l'efficacité énergétique lors de l'électrification :** véhicules électriques et pompes à chaleur offrent des performances énergétiques très supérieures à celles des véhicules thermiques ou des chaudières à combustibles fossiles.

- Habitat : -23 TWh**  
augmentation de l'habitat partagé, limitation volontaire de la consommation de chauffage (-1°C) et d'eau chaude.
- Travail et commerces : -18 TWh**  
recours au télétravail associé à une limitation des surfaces de bureaux, moindre équipement en matériel informatique.
- Déplacements : -22 TWh**  
diminution des transports individuels au profit du covoiturage, réduction de la vitesse moyenne de circulation et de la taille des véhicules.
- Activités industrielles : -20 TWh**  
réduction des besoins de l'industrie agro-alimentaire si adoption d'une alimentation moins transformée, réduction de la production de biens grâce à l'allongement de la durée de vie des équipements.

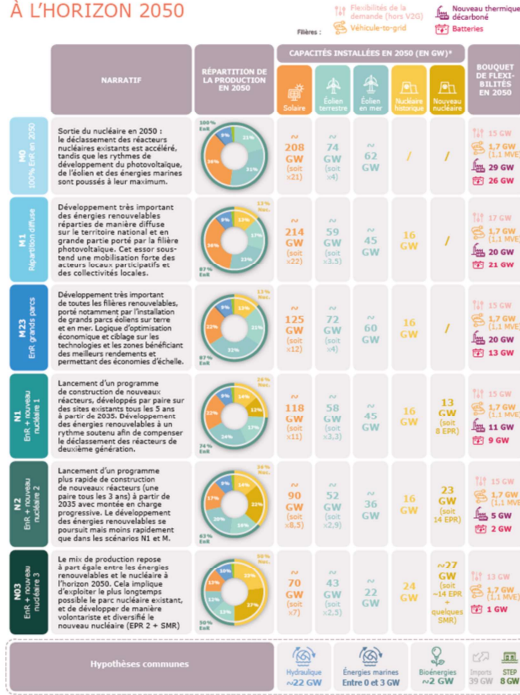
Les leviers d'action pour diminuer les besoins de production... l'électricité la moins chère étant celle que l'on a pas besoin de produire :

Efficacité énergétique : - 200 TWh

Sobriété énergétique : - 90 TWh

D'où résulterait un scénario « sobriété – efficacité » à 555 TWh // 645 TWh de la trajectoire de référence RTE (Réseau de Transport d'Electricité)

## LES SCÉNARIOS DE MIX DE PRODUCTION À L'HORIZON 2050



Tels que présentés par RTE à horizon 2050



scénario lignes force

- MO sortie du nucléaire 2050, toutes EnR dév maxi
- M1 Dév max EnR en diffus, porté ++ par PV avec implication forte participatif et collocs
- M23 Dév max toutes EnR dont grands parc éoliens T et M sur zones ciblées / rendements et optimisation coûts
- N1 prog nouveaux EPR, par paire sur sites existants / 5 ans dès 2035, dév EnR pour compenser arrêts réacteurs 2ième génération
- N2 Prog + rapide nouveaux EPR, par paire / 3 ans dès 2035, dév EnR à rythme moindre / N1 et M
- N03 Mix 50 EnR /50 Nucl en 2050 ==> exploitation max parc nucl actuel + dév ++ EPR2 et SMR

% EnR	GW	répartition prod en 2050										Flexibilité	
		EnR					Nucléaire						
		PV		éolien T		éolien M	Nucl historique		Nucl nouveau				
100%	344	208	X 21	74	X 4	62	/	/	/	/	/	/	+++++
87%	334	214	X 22	59	X 3,5	45	/	16	/	/	/	/	++++
87%	273	125	X 12	72	X 4	60	/	16	/	/	/	/	+++
74%	250	118	X 11	58	X 3,3	45	/	16	13	8 EPR			+++
63%	217	90	X 8,5	52	X 2,9	36	/	16	23	14 EPR			++
50%	186	70	X 7	43	X 2,5	22	/	24	27	14 EPR et SMR			+

hypothèses communes GW				
Hydraulique	En marines	Bioénergies	imports	STEP
22	3	2	39	8

Conso énergie finale SNBC actuelle			
	conso finale	% électricité	TWh élec
2020	1600	25%	400
2050	930	55%	512

	nucléaire	hydraulique	éolien	PV	therm renouv et déchets	gaz	fioul	charbon	total
2021	61,4	25,7	18,8	13,1	2,2	12,8	3,3	1,8	139
GW									
TWh	360,7	62,5	36,8	24,3			38,6		523

Les différentes hypothèses de mix énergétique... puissance industrielle nécessaire... et niveaux de flexibilité(\*) requis pour chacune d'entre elles.

scénario	lignes force	% EnRi	GW
MO	sortie du nucléaire 2050, toutes EnR dév maxi	100%	344
M1	Dév max EnR en diffus, porté ++ par PV avec implication forte participatif et collocs	87%	334
M23	Dév max toutes EnR dont grands parc éoliens T et M sur zones ciblées	87%	273
N1	prog nouveaux EPR, par paire sur sites existants / 5 ans dès 2035, dév EnR pour compenser arrêts réacteurs 2ième génération	74%	250
N2	Prog + rapide nouveaux EPR, par paire / 3 ans dès 2035, dév EnR à rythme moindre / N1 et M	63%	217
N03	Mix 50 EnR /50 Nucl en 2050 ==> exploitation max parc nucl actuel + dév ++ EPR2 et SMR	50%	186

(\*) flexibilité : capacité du réseau à s'adapter (en production et en consommation) pour que sa fréquence et sa tension soient en permanence maintenues au niveau normés requis...

**Enseignement n° 14**

Production d'électricité bas-carbone en France (historique et projections 2030)

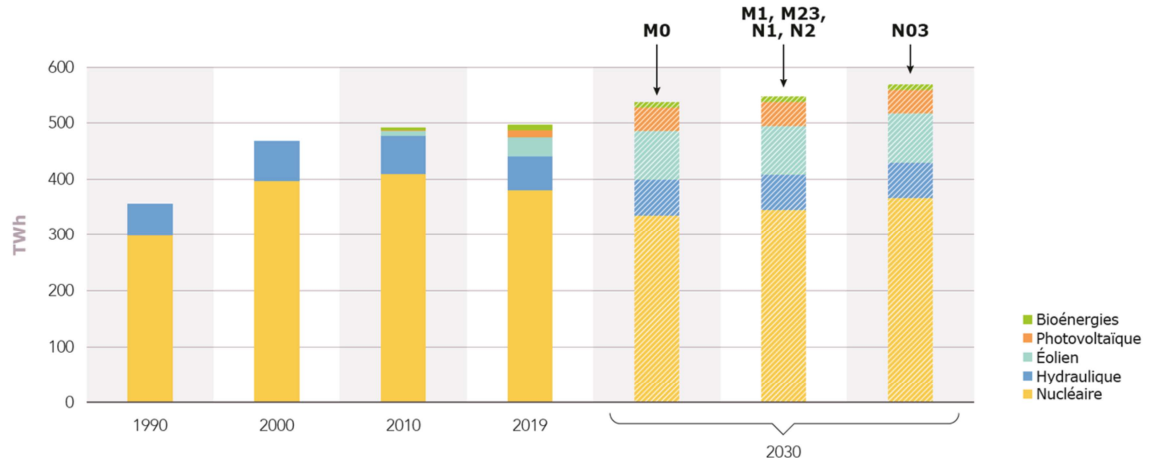
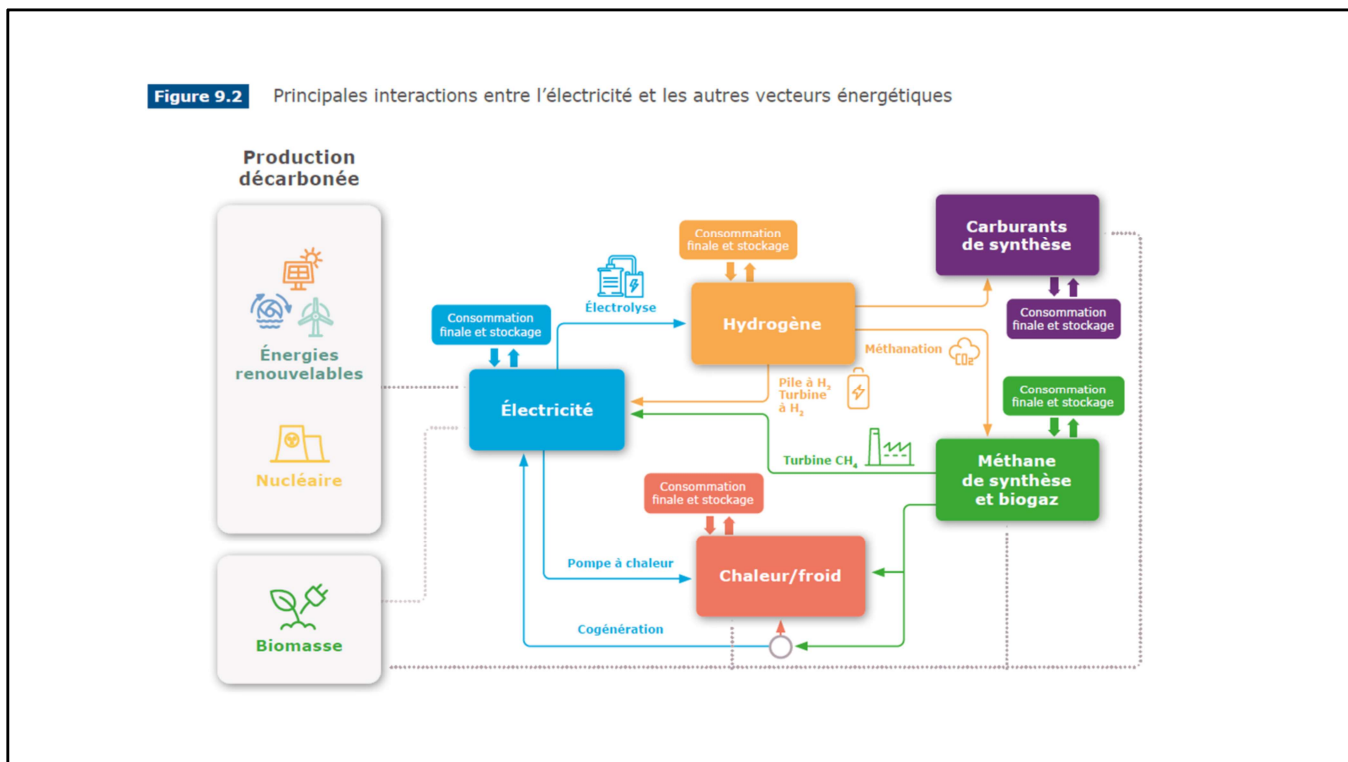


Figure 9.2 Principales interactions entre l'électricité et les autres vecteurs énergétiques



Les Futurs énergétiques 2050 accordent une place importante au sujet de l'hydrogène.

Les systèmes gazier et électrique sont d'ores et déjà en interface, via les centrales thermiques produisant de l'électricité à partir de gaz.

À long terme, les interactions entre le système électrique et les autres vecteurs sont appelées à se développer et à se multiplier :

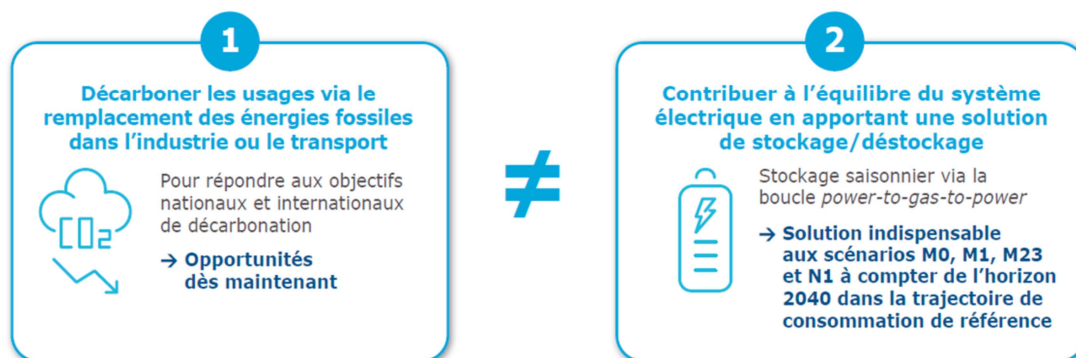
- la décarbonation complète du secteur énergétique conduit à envisager de nouveaux transferts entre vecteurs en vue de décarboner plus facilement certains usages de l'énergie ou de bénéficier de complémentarités entre vecteurs.

Dans ce contexte, l'une des évolutions importantes projetées dans les scénarios de décarbonation consiste à **développer la production d'hydrogène par électrolyse à partir d'électricité bas-carbone**.

L'hydrogène ainsi produit peut alimenter certains usages directs ou être transformé en combustibles ou carburants de synthèse sous forme gazeuse (méthane...) ou liquide (ammoniac, méthanol...) qui pourront eux-mêmes servir à des usages énergétiques.

L'hydrogène ou ses dérivés peuvent également être réutilisés pour produire de l'électricité dans des centrales thermiques.

**Figure 9.3** Deux raisons distinctes de développer la production d'hydrogène bas-carbone



Les pouvoirs publics ont défini en septembre 2020 une stratégie hydrogène

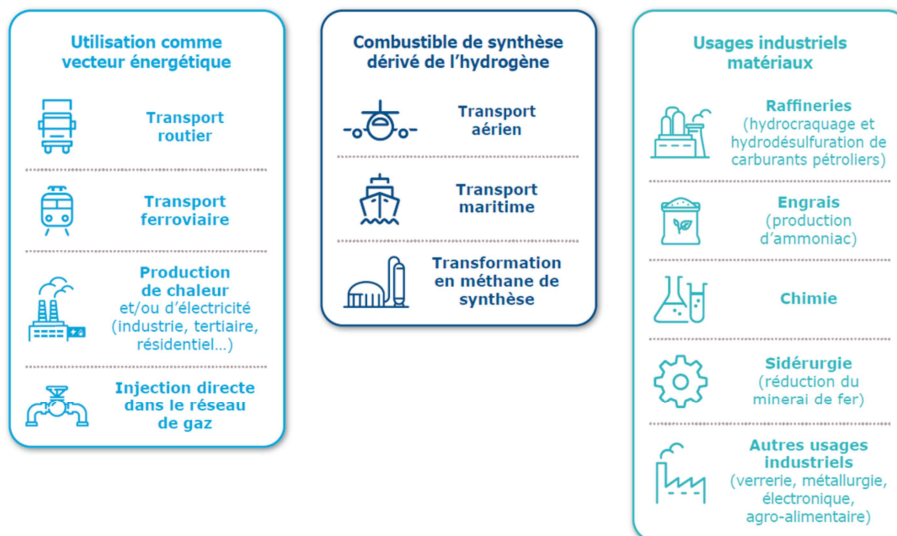
D'une part, l'hydrogène constitue un moyen de décarboner des secteurs difficiles voire impossibles à électrifier sur le plan technique ou économique

- production d'ammoniac,
- sidérurgie,
- aviation, transport maritime,
- certains volets de la mobilité lourde...

D'autre part, le développement de centrales thermiques et de stockages de gaz décarbonés pour couvrir les besoins de flexibilité inter-saisonniers du système électrique s'avère indispensable dans les scénarios comprenant de larges proportions d'énergies renouvelables variables :

5 des 6 scénarios étudiés dans les Futurs énergétiques 2050 impliquent de disposer de cette solution en France d'ici 2050.

Figure 9.5 Usages de l'hydrogène à moyen et long terme

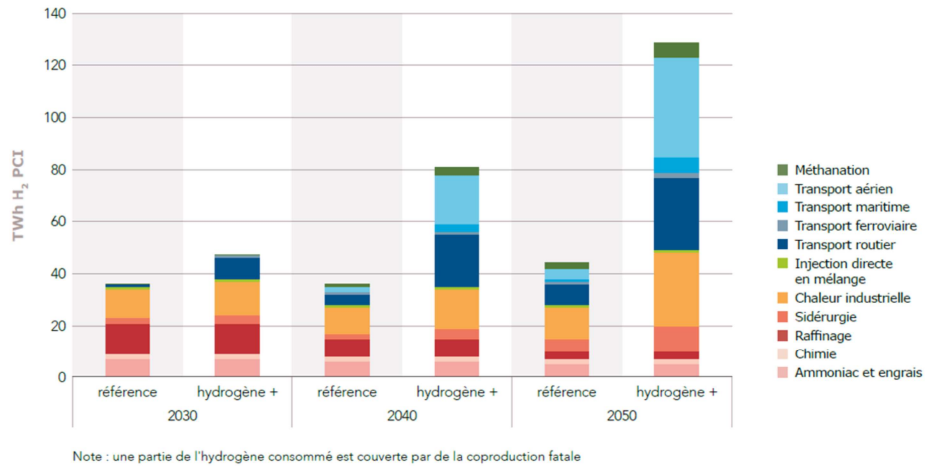


Pour le secteur de l'hydrogène, le **premier enjeu** consiste à **décarboner la production pour les usages matériaux actuels de l'hydrogène**, qui est aujourd'hui quasi totalement issue d'énergies fossiles via des procédés fortement émetteurs de gaz à effet de serre.

**À moyen terme**, le développement de l'électrolyse pour **remplacer les unités actuelles de production d'hydrogène** (notamment unités de vaporeformage du méthane) constitue ainsi un des axes prioritaires identifiés dans la stratégie hydrogène de la France, ainsi que dans celles d'autres pays.

**À plus long terme**, les **usages matériaux actuels de l'hydrogène sont appelés à se réduire**, étant donné que les principaux secteurs concernés (raffinage, production d'engrais) sont marqués par des projections de baisse d'activité, en lien avec la décarbonation de l'économie et la transformation du système agricole. De nouveaux usages matériaux, notamment dans la sidérurgie ou les biocarburants, pourraient en revanche se développer.

**Figure 9.6** Consommation d'hydrogène (hors utilisation pour la production électrique) dans les trajectoires de référence et « hydrogène + »



Les trajectoires contrastées :

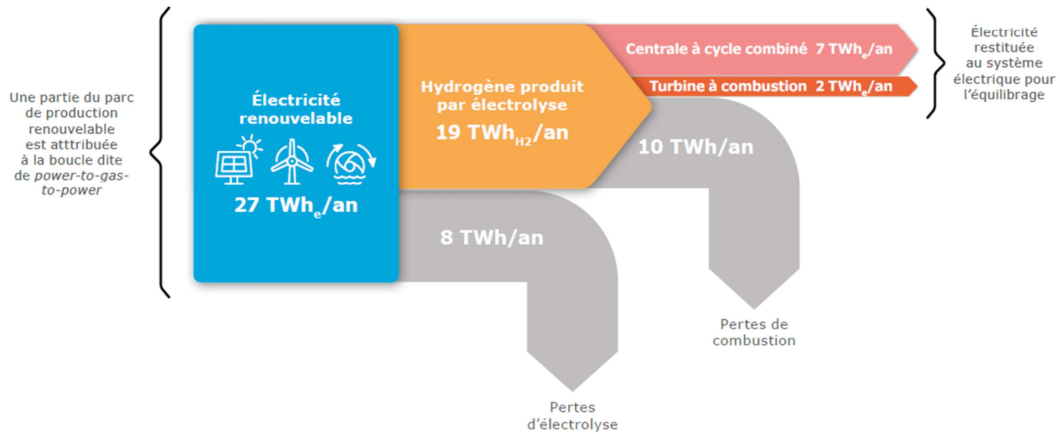
- une **trajectoire de référence**, qui s'inscrit dans les orientations du scénario AMS (Avec Mesures Supplémentaires) de la SNBC et intègre les objectifs du plan de relance et de son volet hydrogène.

La SNBC se concentre essentiellement sur la décarbonation des usages industriels actuels de l'hydrogène et un développement ciblé sur quelques usages comme le transport routier.

Malgré la décroissance des secteurs historiques (raffinage, engrais), les volumes d'hydrogène consommés augmentent à long terme.

- une **trajectoire « hydrogène + »**, qui repose sur un développement plus fort de ce vecteur dans certains secteurs industriels (sidérurgie en particulier) et pour la décarbonation des soutes maritimes et aériennes du transport international, via des carburants de synthèse ... 130 TWh pci en 2050 !

**Figure 9.7** Diagramme illustrant le fonctionnement de la production d'électricité thermique à partir d'hydrogène (valeurs correspondant au scénario M23 2050 dans une configuration de système hydrogène flexible)

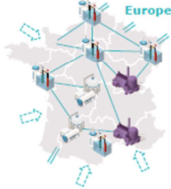




Je rappelle que le scénario M23 correspond à :

- 13% de nucléaire historique
- 87% d'énergies renouvelables (EnR) intermittentes

Nous n'en sommes plus là depuis la décision du Président de la République à Belfort d'engager 6 EPR2 et l'étude de 8 supplémentaires... sans aucun débat sur la révision de la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie dont on nous annonce qu'elle sera actée par décret... après consultation de la CNDP (commission nationale du débat public) et évitement du Parlement !

**Figure 9.1** Illustration de différentes configurations possibles pour le développement de l'hydrogène à long terme (liste non exhaustive)

	Vision d'un système hydrogène largement interconnecté et très flexible	Référence : Système hydrogène flexible	Vision d'un système hydrogène peu flexible
Électrolyse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Électrolyseurs flexibles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Électrolyseurs flexibles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Électrolyseurs non flexibles : fonctionnement en bande</li> </ul>
Stockage & réseau	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stockage largement accessible à l'échelle européenne</li> <li>• Fortes interconnexions + routes commerciales avec le reste du monde, pour importer de l'hydrogène à moindre coût</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stockage largement accessible (soit via les interconnexions, soit via son développement en France)</li> <li>• Échanges possibles avec l'étranger pour mutualiser les capacités de stockage, mais pas d'imports massifs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilités de stockage très limitées</li> <li>• Pas d'imports-exports</li> </ul>
Production thermique	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Centrales thermiques utilisant l'hydrogène du réseau (produit en France ou importé)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Centrales thermiques utilisant principalement l'hydrogène du réseau</li> <li>• Variante avec combinaison de méthane de synthèse et de biométhane</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Centrales thermiques alimentées par du méthane de synthèse produit localement</li> </ul>
Coût du gaz pour la production d'électricité	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Environ 70 €/MWh<sub>élec</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Environ 120-130 €/MWh<sub>élec</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Environ 160 €/MWh<sub>élec</sub></li> </ul>
Cartographie schématisée du réseau			

L'idée est ici d'illustrer la plus ou moins grande intégration du « système H2 » dans le système électrique... et son impact sur les coûts du gaz pour la production d'électricité.

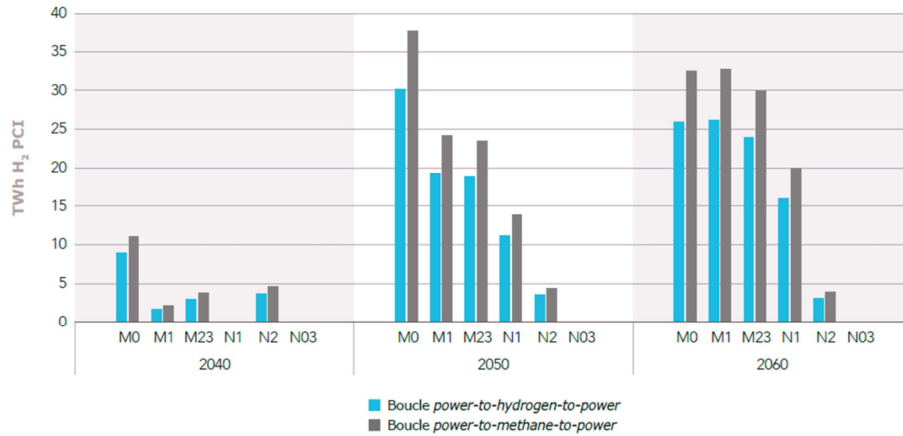


**Figure 9.18** Technologies dont la maîtrise et l'industrialisation sont nécessaires dans l'hypothèse d'un système hydrogène flexible et dans la configuration d'un système hydrogène non flexible



Et si nous devons retenir un scénario de mix énergétique autre que le N03 - alors des progrès technologiques seraient nécessaires - de différentes natures et niveaux en fonction du scénario de mix énergétique retenu et du niveau de flexibilité recherché.

**Figure 9.8** Besoins d'hydrogène pour l'équilibrage en France aux différents horizons (configuration de référence : absence de flexibilité de la production d'électricité au biogaz)

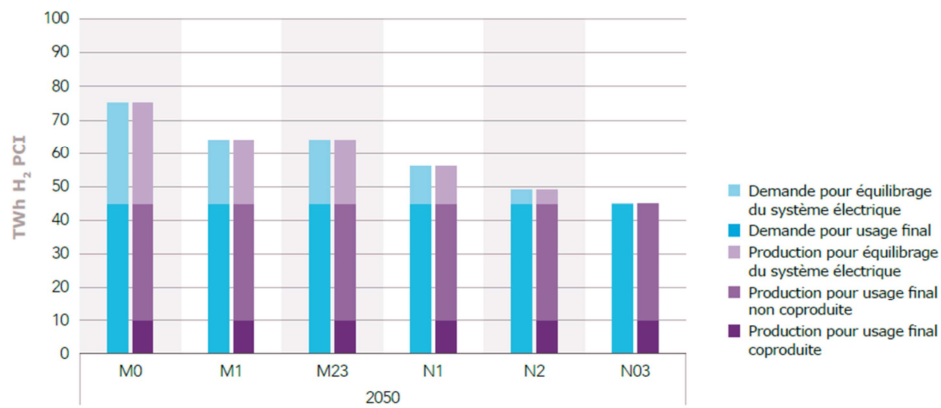


Mais le visuel précédent doit être rapproché de celui-là !

Car en effet on voit ici que les besoins en Hydrogène seront fonction de la proportion ENRp et ENRi donc du scénario retenu résultant de la SNBC à actualiser et traduit dans la future PPE.

Je pense qu'on va vers le N03... ce qui **questionne sur la place de l'Hydrogène dans le système électrique national.**

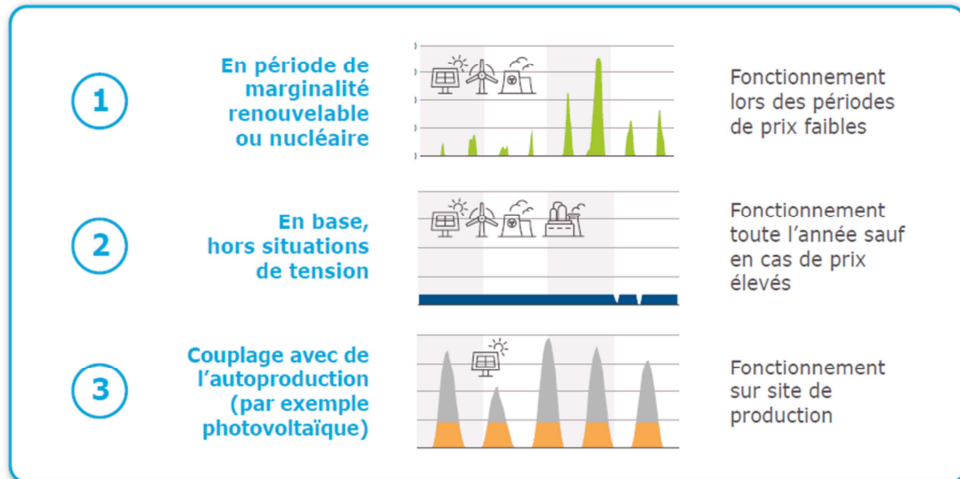
**Figure 9.9** Volume total d'hydrogène utilisé en France dans les différents scénarios à l'horizon 2050 (configuration de référence : développement d'une boucle *power-to-hydrogen-to-power* en France avec possibilités de stockage de l'hydrogène)



En synthèse à l'horizon 2050, voilà ce que cela pourrait donner.

On pourrait en déduire que si l'on va vers N03 c'est essentiellement la demande pour usage final qui tirera le besoin de production d'Hydrogène.

**Figure 9.10** Illustration de différents modes de fonctionnement possibles pour les électrolyseurs



Les différents modes opératoires envisageables pour les électrolyseurs.

Un fonctionnement fondé sur les signaux de prix faibles (mode n° 1) permet de cibler un approvisionnement en électricité à bas coût et bas-carbone, avec des effets très positifs sur les émissions de gaz à effet de serre.

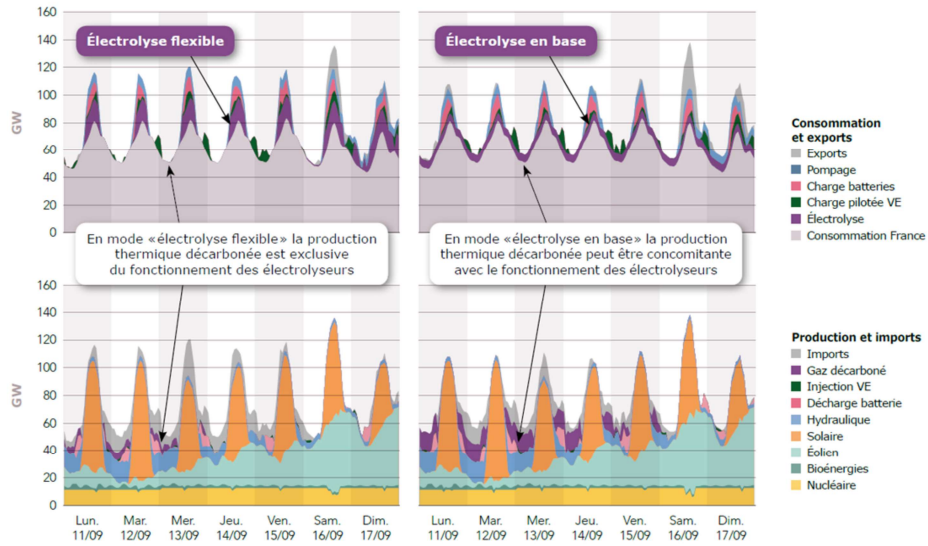
En revanche, il implique un fonctionnement intermittent de l'électrolyse et donc un amortissement plus difficile des coûts fixes des électrolyseurs.

À l'inverse, un fonctionnement en bande des électrolyseurs (mode n° 2) permet de limiter les problématiques de stockage pour les consommateurs d'hydrogène souhaitant un approvisionnement continu.

Toutefois, un tel mode opératoire contribue faiblement à la flexibilité du système électrique et à l'optimisation de l'utilisation du mix.

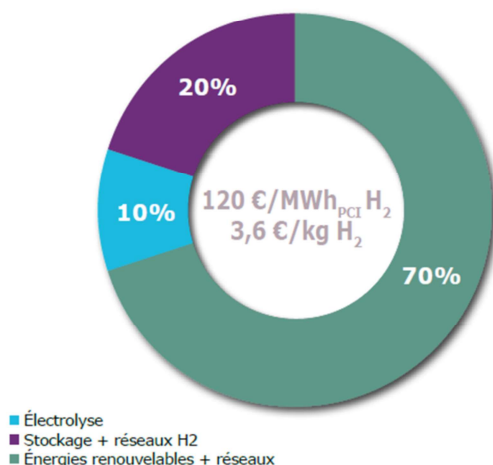
Enfin, un mode opératoire intégrant un couplage avec l'autoproduction (mode n° 3) conduit à désensibiliser l'approvisionnement en électricité des prix de marché.

**Figure 9.12** Exemple de courbes de charge des électrolyseurs dans le mix électrique du scénario M23 2050, sur une semaine de septembre – Comparaison de la configuration de référence où les électrolyseurs fonctionnent de façon flexible (à gauche) et de la configuration où les électrolyseurs fonctionnent en bande (à droite)



Courbe de charge des électrolyseurs dans le scénario M23 2050

**Figure 9.15** Estimation des coûts de production, de transport et de stockage d'hydrogène dans les scénarios étudiés



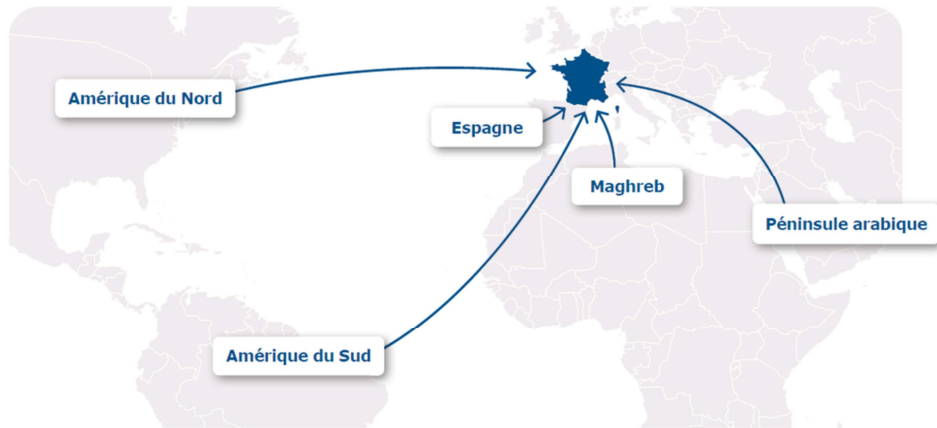
Les analyses réalisées dans le cadre de l'étude Futurs énergétiques 2050 intègrent une modélisation explicite et endogène de la production d'hydrogène par électrolyse en France.

Le coût de l'hydrogène utilisé en France n'est donc pas une hypothèse exogène mais bien un résultat de simulation du système électrique.

L'analyse permet ainsi d'évaluer les coûts complets de production de l'hydrogène en France à long terme.

Ces coûts complets incluent les moyens nécessaires à l'électrolyse (coûts de la production d'électricité, des électrolyseurs et du réseau électrique nécessaire) ainsi que l'éventuel transport et stockage de l'hydrogène.

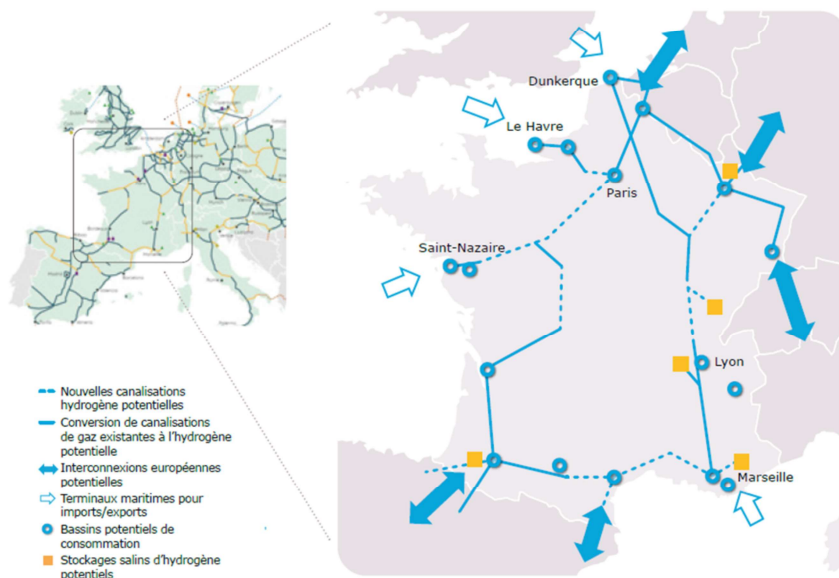
**Figure 9.16** Routes commerciales envisagées pour l'importation d'hydrogène décarboné à l'horizon 2050



Au-delà des incertitudes économiques, le recours aux imports soulève une question politique sur l'indépendance énergétique.

Même si le mix énergétique français est dès aujourd'hui fortement dépendant de l'import de combustibles fossiles, le maintien d'une part de dépendance à d'autres pays pour des combustibles tels que l'hydrogène n'est pas jugé souhaitable pour un certain nombre d'acteurs.

**Figure 9.19** Préfiguration de la structure potentielle d'un réseau hydrogène européen incluant la France en 2040 dans l'hypothèse d'un système hydrogène flexible, inspirée de l'étude European Hydrogen Backbone (Gas for Climate, 2021)



Le développement de l'hydrogène implique également une réflexion sur les besoins d'infrastructures de transport de l'hydrogène.

D'une part, à l'échelle nationale, le développement d'une infrastructure de transport d'hydrogène peut contribuer à permettre l'accès à des capacités de stockage disponibles en France et d'envisager ainsi une flexibilité du fonctionnement des électrolyseurs.

Il permettrait également le foisonnement de la production et la consommation d'hydrogène sur l'ensemble du territoire national.

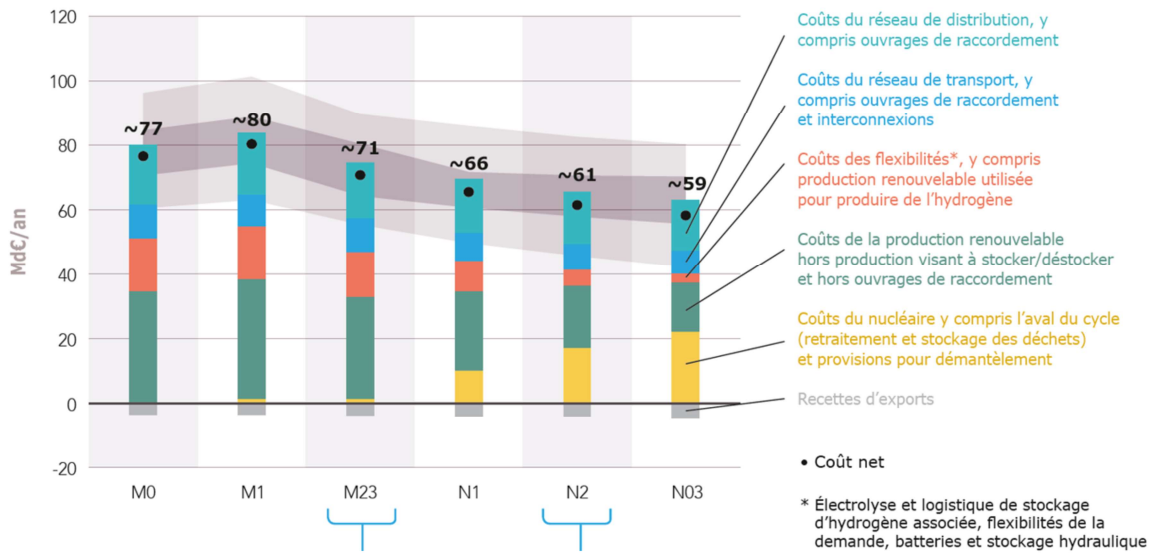
Les caractéristiques du réseau à développer dépendent néanmoins fortement de la localisation des différentes infrastructures de production, de stockage et de consommation d'hydrogène.



**Enseignement n° 6**

Coûts complets (production + acheminement + flexibilités) en France selon les scénarios (dans la trajectoire de consommation de référence) à l'horizon 2060, dans le cas central et selon les variantes

Coûts complets annualisés des scénarios à l'horizon 2060



Et un dernier visuel sur la place du système Hydrogène dans les coûts complets du système de production électrique national... à horizon 2060 où l'on voit que l'électricité est nécessaire pour la contribution modeste de l'Hydrogène à la flexibilité du réseau.

# En conclusion « très » provisoire

En me référant à l'étude RTE des Futurs Energétiques 2050 - et sous réserve de ma compréhension du sujet - je retiens les idées suivantes :

- Jusqu'à 50 TWh d'Electricité pour produire de l'Hydrogène / 645 TWh de conso finale d'électricité.
- Cet Hydrogène sera à usage final pour l'essentiel.
- Il pourra aussi être utilisé à des fins de flexibilité du réseau et ce d'autant plus nécessairement que la part d'ENR*i* serait forte dans le mix énergétique national ce vers quoi nous n'allons pas ... et là est la question politique.

La SNBC 3 n'est toujours pas connue ni débattue

La PPE qui en résulte non plus

... et je m'interroge avec mes collègues sur l'opacité de la démarche du Gouvernement... qui a par exemple présenté puis retiré un PJJ Souveraineté énergétique, bienvenu, puis l'a restreint et ré-annoncé... on n'y comprend plus rien dans les intentions

Quant à la stratégie nationale Hydrogène, il faudra arbitrer sans trop tarder entre production sur le sol national – qui a ma faveur a priori – et importation – qui l'a beaucoup moins !

La progression des technologies de l'Hydrogène et des modes de stockage sera structurante...