



# TerraWater

## Le scénario des Voix

Présentation des hypothèses et partis pris pour l'atteinte par la France d'un mix énergétique fiable et décarboné à l'horizon 2050, pérenne et soutenable à l'horizon 2060, et au-delà

**Un scénario pour s'assurer de la solidité des promesses de la  
France d'aujourd'hui à celle de demain**

# Partie 1

**Le scénario TerraWater – Futurs énergétiques France 2050**

---

# Pourquoi ce scénario ?

Nous n'avons pas trouvé notre compte dans les scénarios existants,  
notamment en termes de faisabilité et de robustesse



# Les Contours du scénario

## Cadre

France métropolitaine

Horizon 2050

Mix énergétique

+65% de la demande électrique

Pas de dépendance vis à vis des importations sur le réseau

Pas d'hypothèse sur le PIB ou sa croissance

## Principes

Faisabilité technique et industrielle

Réalisme social

Fiabilité et robustesse du système électrique

Optimisation économique et industrielle des équipements

## Objectif

Neutralité carbone du mix en 2050 et au-delà

Approvisionnement fiable en électricité

Réduction de la pression sur les ressources et les espaces naturels

Souveraineté

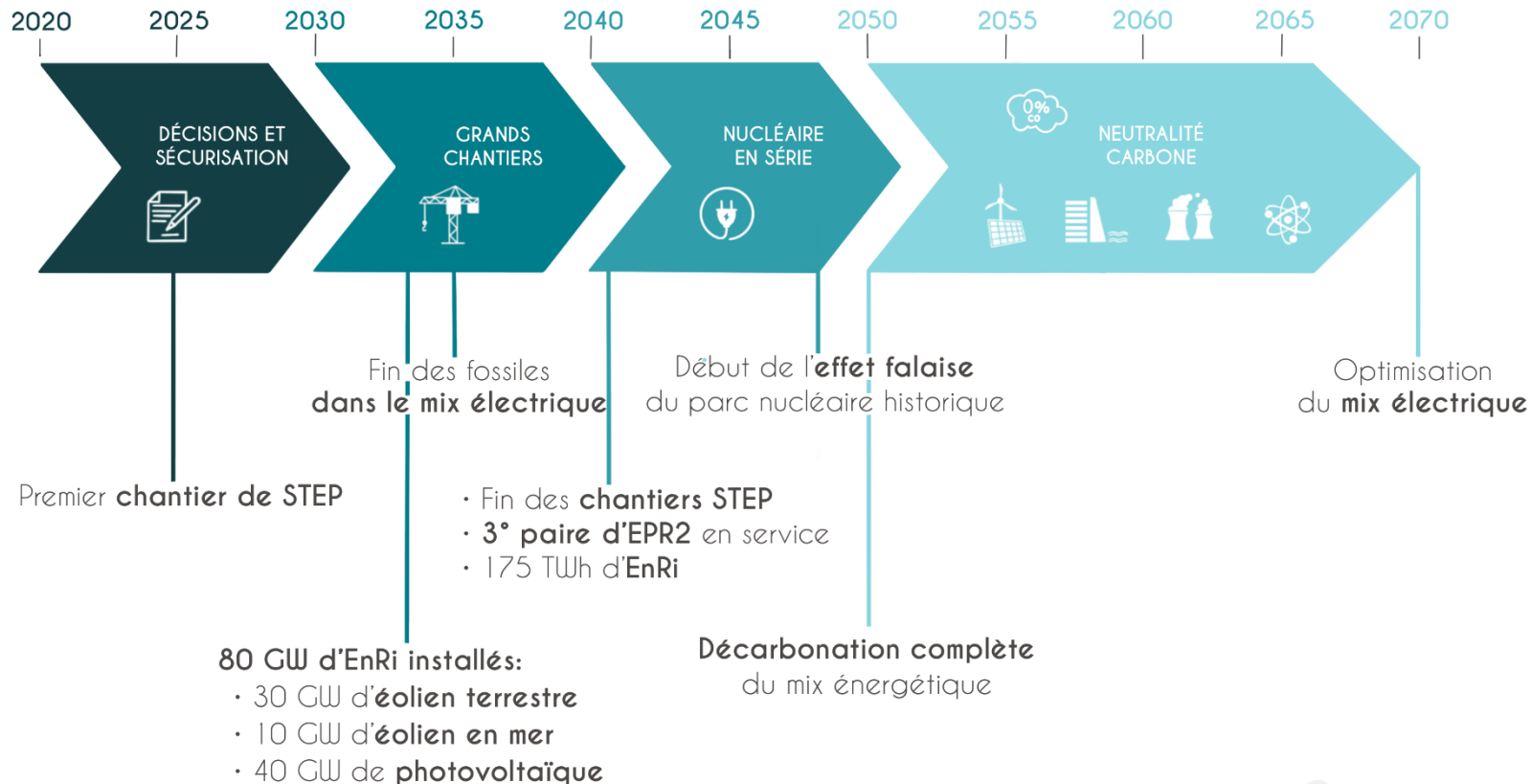
Réindustrialisation

Sortie complète et définitive des énergies fossiles

Solidarité énergétique

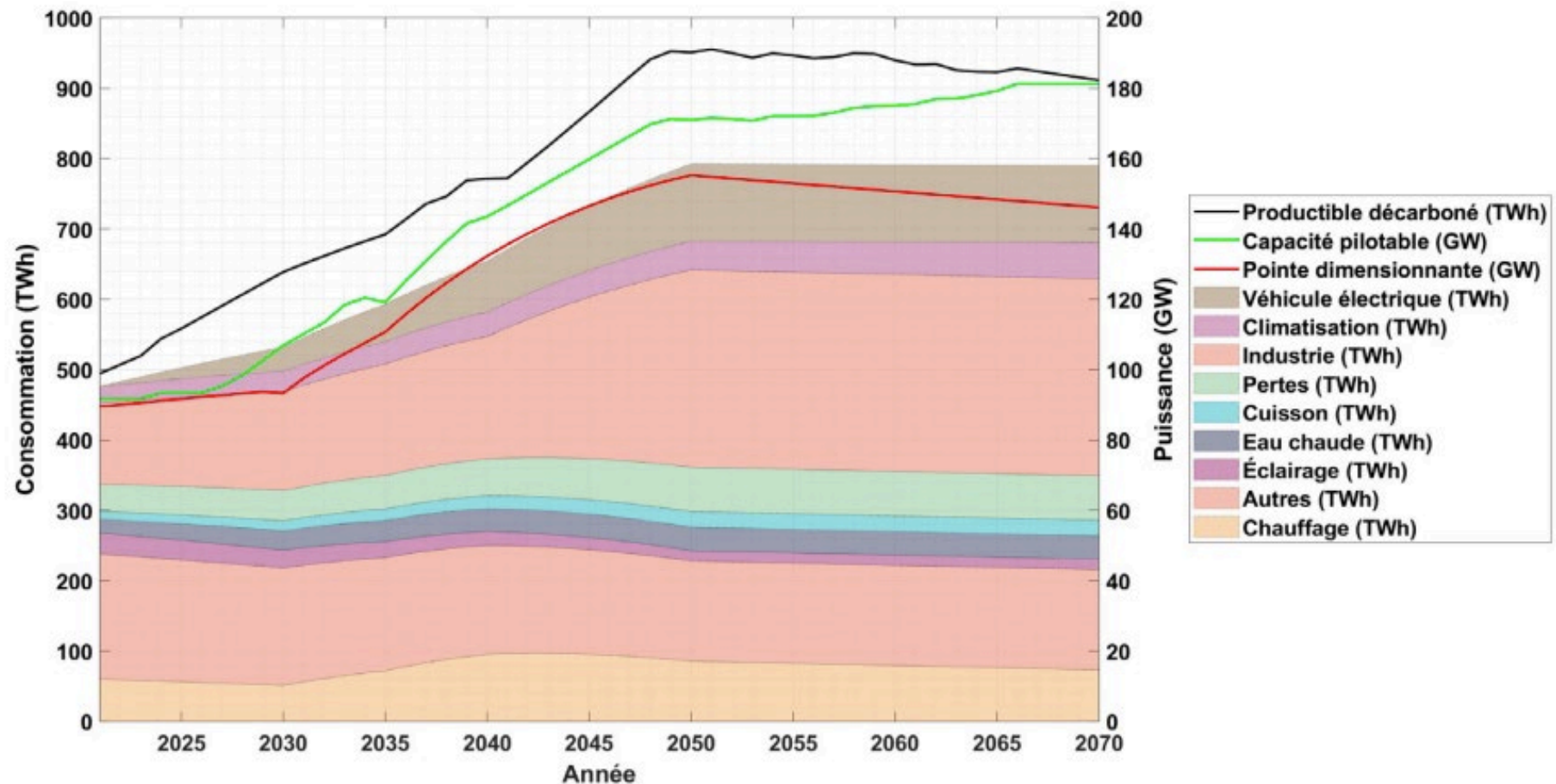
# Comment ?

Recherche de l'optimal technique / Relance de la filière nucléaire (EPR2 puis diversification) / Optimisation de l'usage des ENRi en association avec les STEP / Rationalisation des réseaux par le biais d'une électrification massive / Sédentarisation de la production d'hydrogène industriel / Recherche de Décarbonation globale / Libérer et soutenir autant que possible les capacités de nos voisins européens



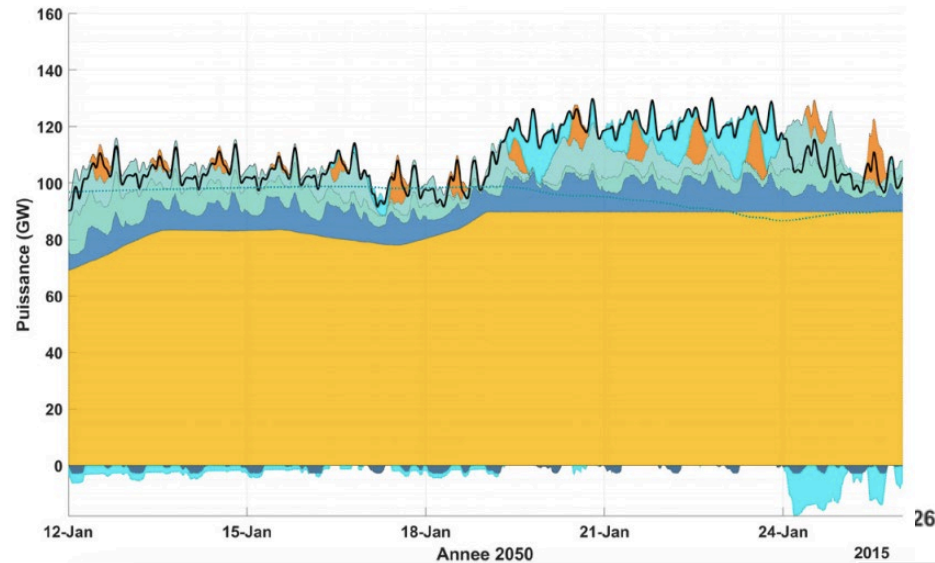


## Évolution de la consommation électrique par secteur



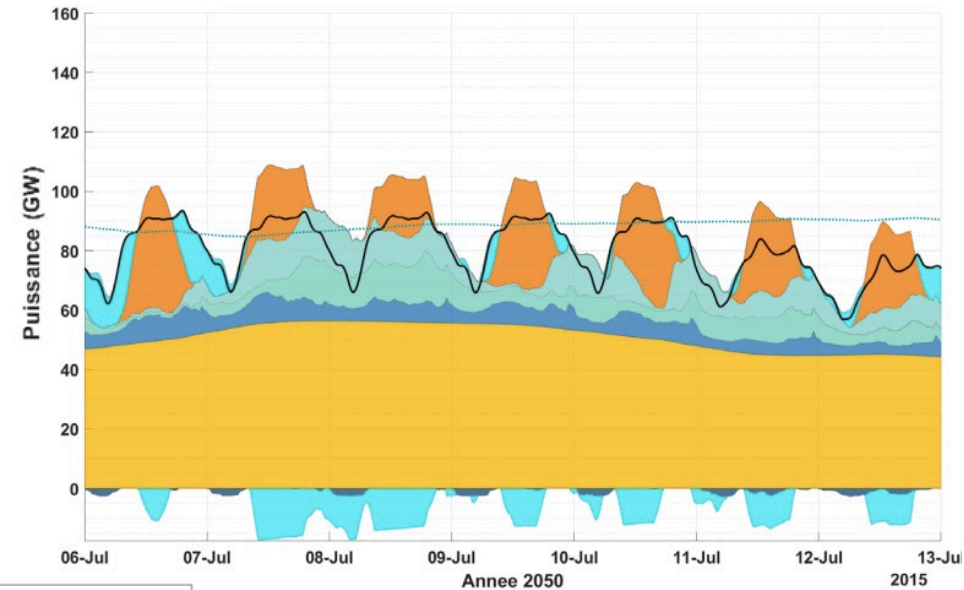
## Comparaison hiver été : cas normaux

Semaine hivernale normale 2050



*Le nucléaire opère en base à sa puissance maximale. Les STEP, les barrages hydroélectriques (et marginalement les TAC biomasse si la demande est très élevée), assurent le suivi de la demande, notamment durant les phases de production limitée des EnRi.*

Semaine estivale normale 2050

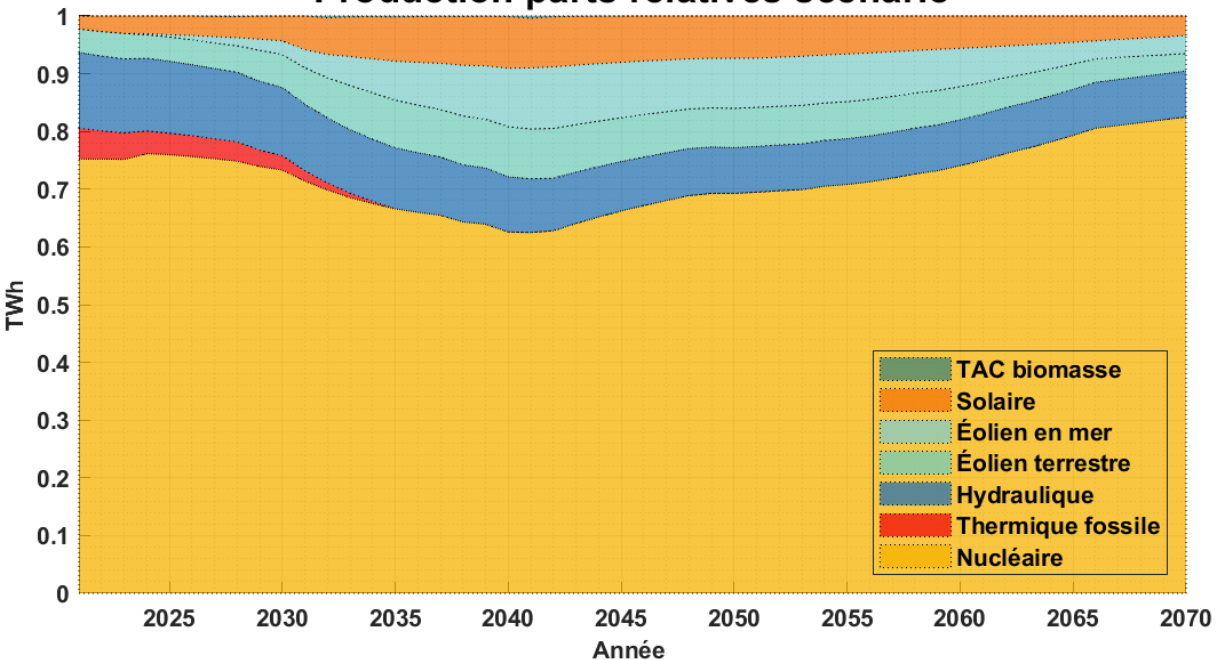


*La modulation de la production nucléaire est limitée à quelques MW/min, et l'hydroélectrique/STEP assure le suivi de la demande. Le solaire assure le remplissage des STEP en journée.*

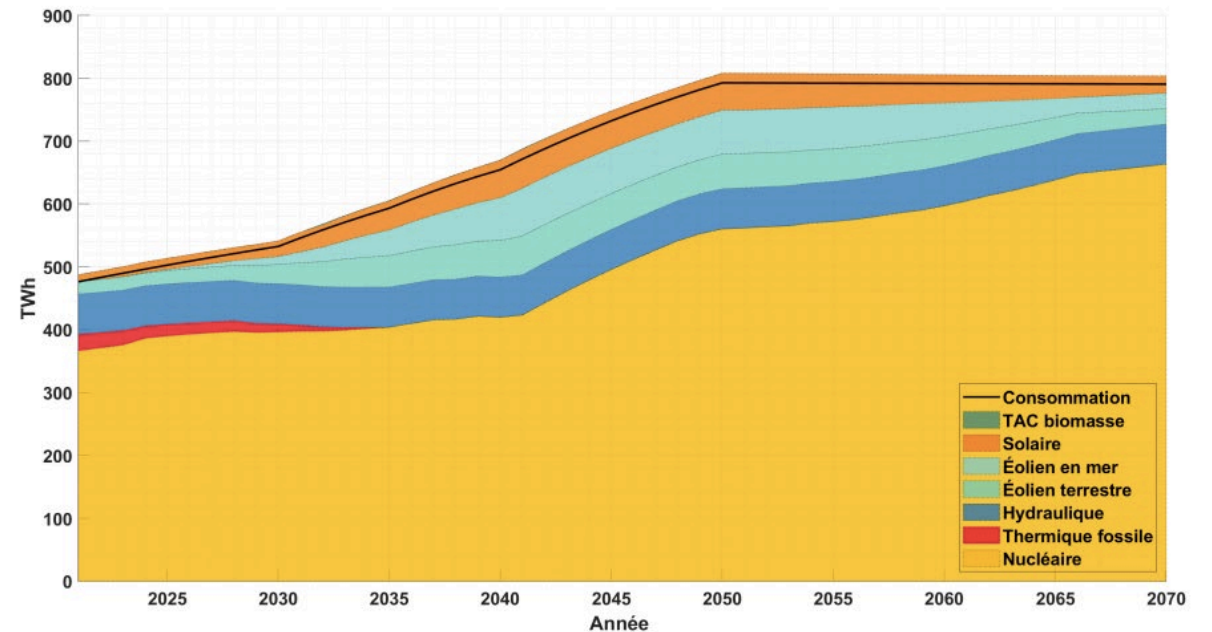


Maintien de la  
base nucléaire

Production parts relatives scénario



Évolution de la Production électrique par source

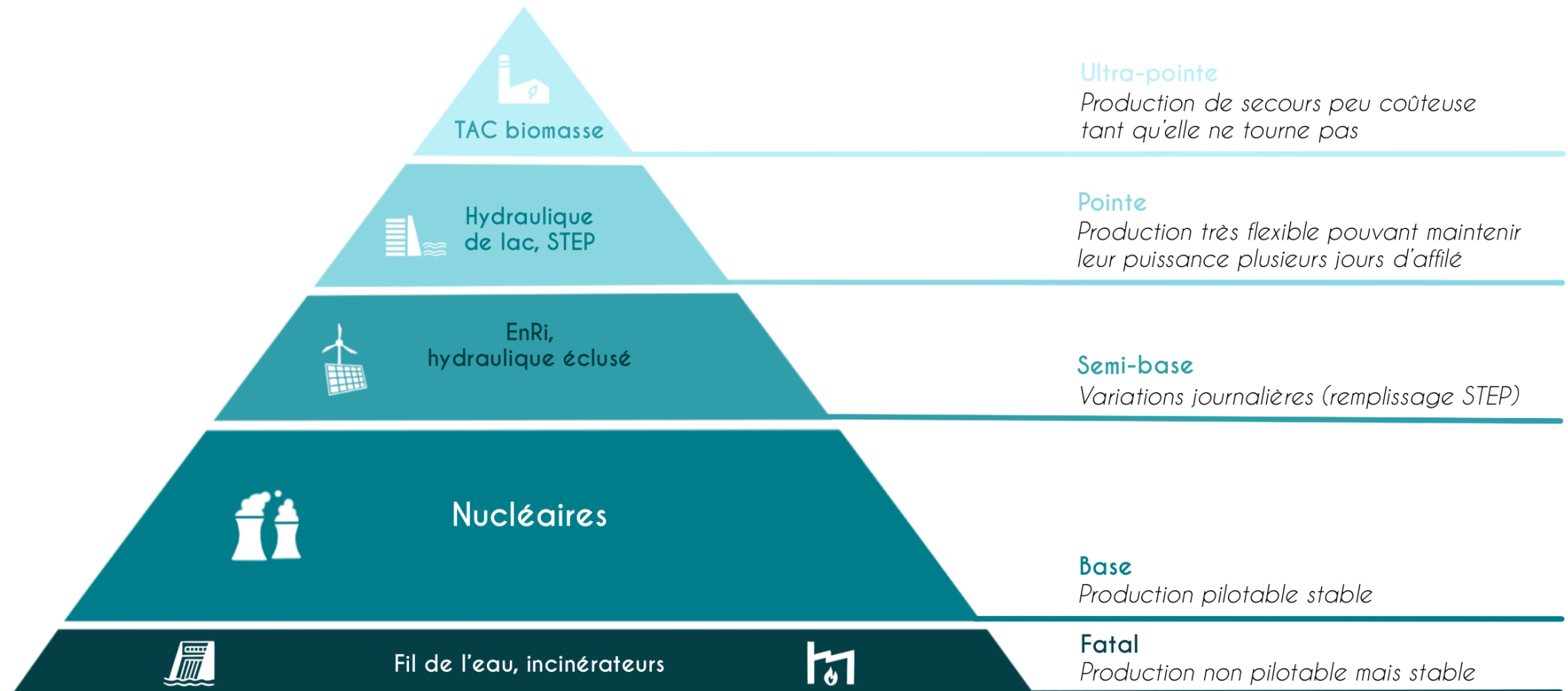


EnRi en forte  
croissance sur la  
période de transition



# L'inversion logique de l'ordre d'appel sur le réseau

Les sources d'énergie sont  
utilisées à leur optimum  
technique de fonctionnement



# Les autres éléments marquant

Pas de réseau d'hydrogène

Fin total du gaz et de son réseau

Une volonté de relancer la recherche dans le nucléaire futur

Une prospective poussée au-delà du seuil théorique de 2050

La biomasse limitée à sa part fatale

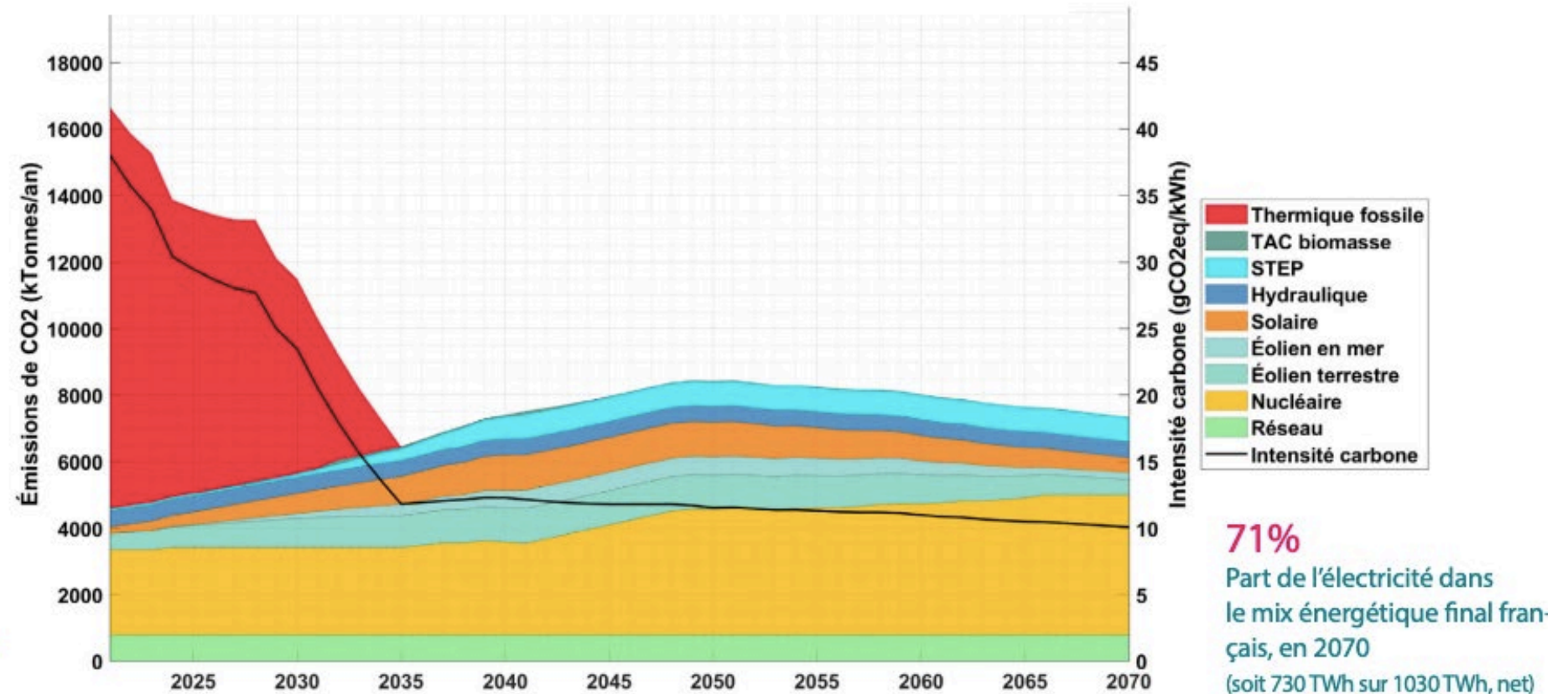
Une production de pointe assurée par des TAC biomasse,  
polyvalente

# L'objectif d'un minimum de pari

| Tous les scénarios, y compris celui des Voix, formule des paris sur :<br>- Le fait que les décisions soit prises assez tôt<br>- L'acceptation des nouvelles infrastructures<br>- Les ressources humaines et les compétences requises |                                                                               |                                                    |                                               |                                                                                  |                                                      |                                     |                                                                                 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| RTE N03                                                                                                                                                                                                                              | L'ampleur du développement des SMR                                            | La disponibilité des imports d'électricité         | Le déploiement d'un réseau hydrogène          |                                                                                  |                                                      |                                     |                                                                                 |
| RTE N1                                                                                                                                                                                                                               | L'ampleur de la flexibilité                                                   | La disponibilité des imports d'électricité         | Le déploiement d'un réseau hydrogène          | La faisabilité et la fiabilité d'un réseau électrique à forte pénétration d'EnRi | Le développement du stockage par batterie            | La disponibilité des espaces au sol |                                                                                 |
| ADEME S3                                                                                                                                                                                                                             | Les modifications profondes des comportements et sur la flexibilité du réseau | La réalité des capacités en biomasse               | Le déploiement d'un réseau hydrogène          | La disponibilité en métaux et matériaux rares                                    | Les hypothèses de gains en efficacité (bâtiments...) | La disponibilité des espaces au sol | La production d'électricité nécessaire pour accompagner une réindustrialisation |
| Négawatt 2022                                                                                                                                                                                                                        | Les modifications profondes des comportements et sur la flexibilité du réseau | La réalité des capacités en biomasse               | Le déploiement d'un réseau hydrogène          | La disponibilité en métaux et matériaux rares                                    | Les hypothèses de gains en efficacité (bâtiments...) | La disponibilité des espaces au sol | La production d'électricité nécessaire pour accompagner une réindustrialisation |
| Négatep                                                                                                                                                                                                                              | Le rythme immédiat de construction de la filière nucléaire                    | Les conséquences du maintien de production fossile | La conservation d'un mix non décarboné à 2050 | L'intensité carbone du mix encore élevée à horizon 2050                          |                                                      |                                     |                                                                                 |
| CEREME                                                                                                                                                                                                                               | Le rythme immédiat de construction de la filière nucléaire                    | Les conséquences du maintien de production fossile | Le déploiement d'un réseau hydrogène          | Une intensité carbone du mix encore élevée à horizon 2050                        |                                                      |                                     |                                                                                 |

# L'intensité carbone du mix électrique en baisse grâce à l'électrification massive

## Évolution de l'empreinte carbone de l'électricité le long de la trajectoire d'électrification et de décarbonation du système énergétique français





Souveraineté

Relance de la filière nucléaire

Redémarrage d'un programme  
hydro

Equité dans l'accès à l'énergie

Impact environnemental

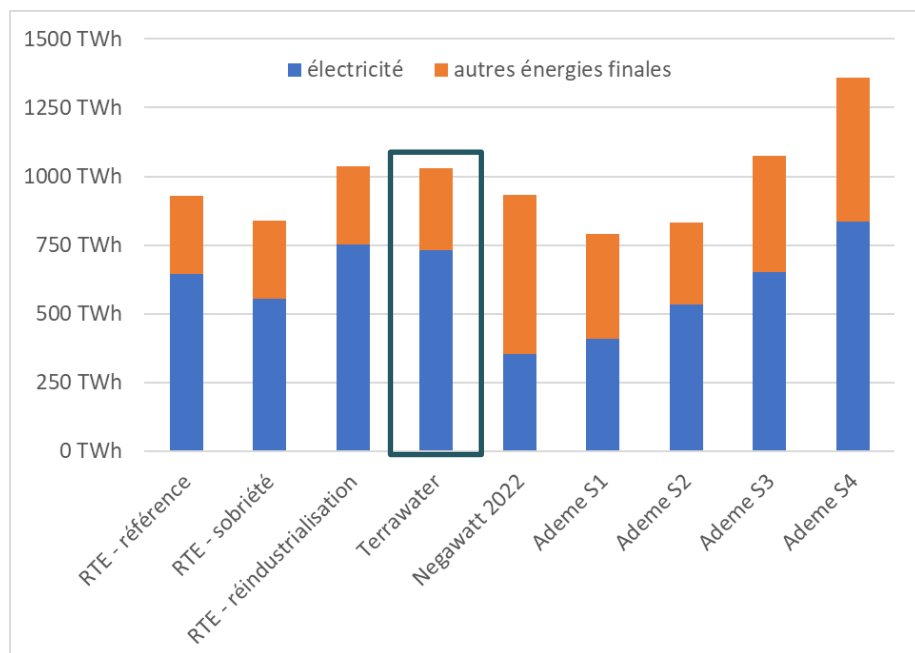
Réindustrialisation

# Partie 2-1

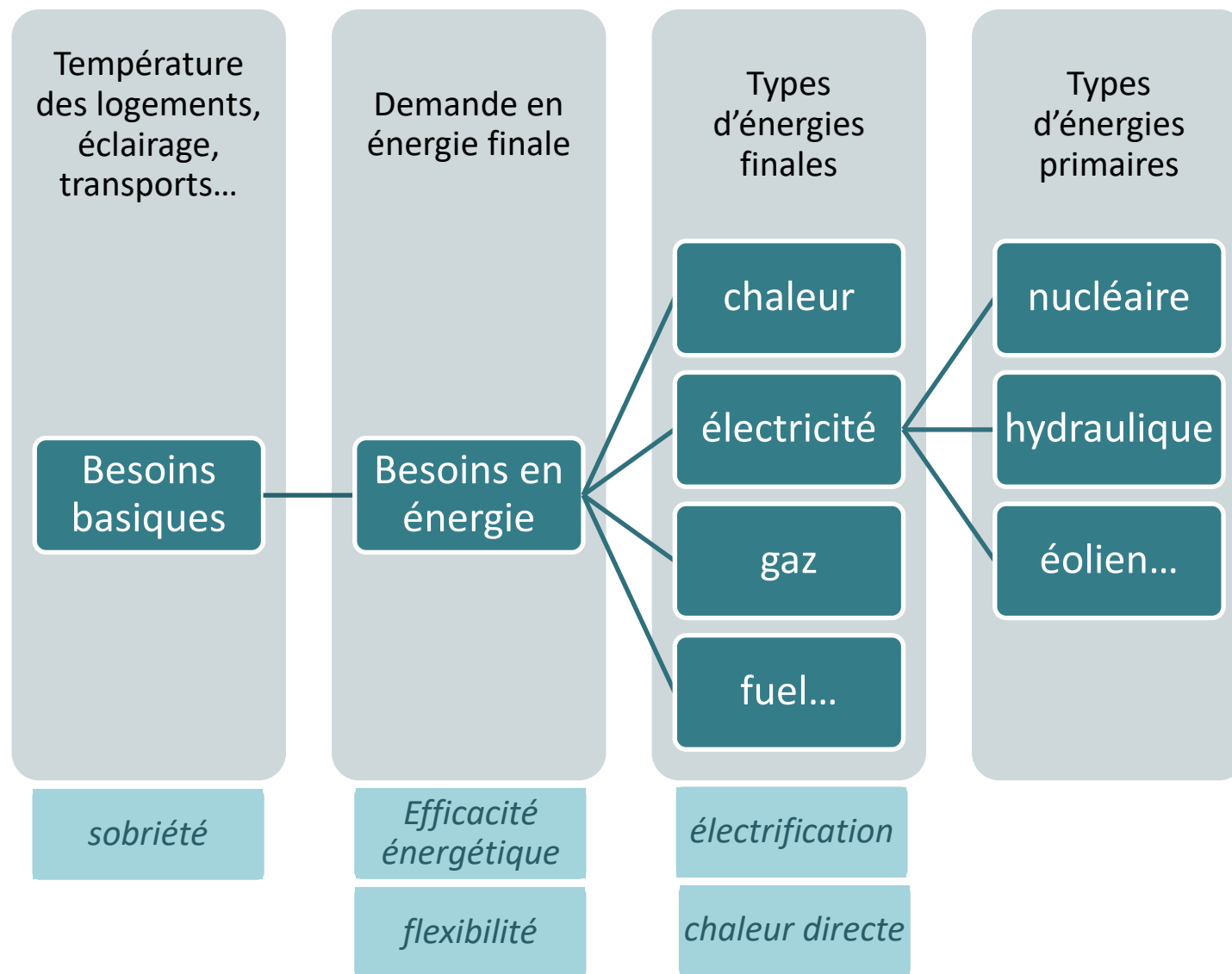
Éléments de réflexion sur les scénarios énergétiques

---

## Scénario énergétique / électrique



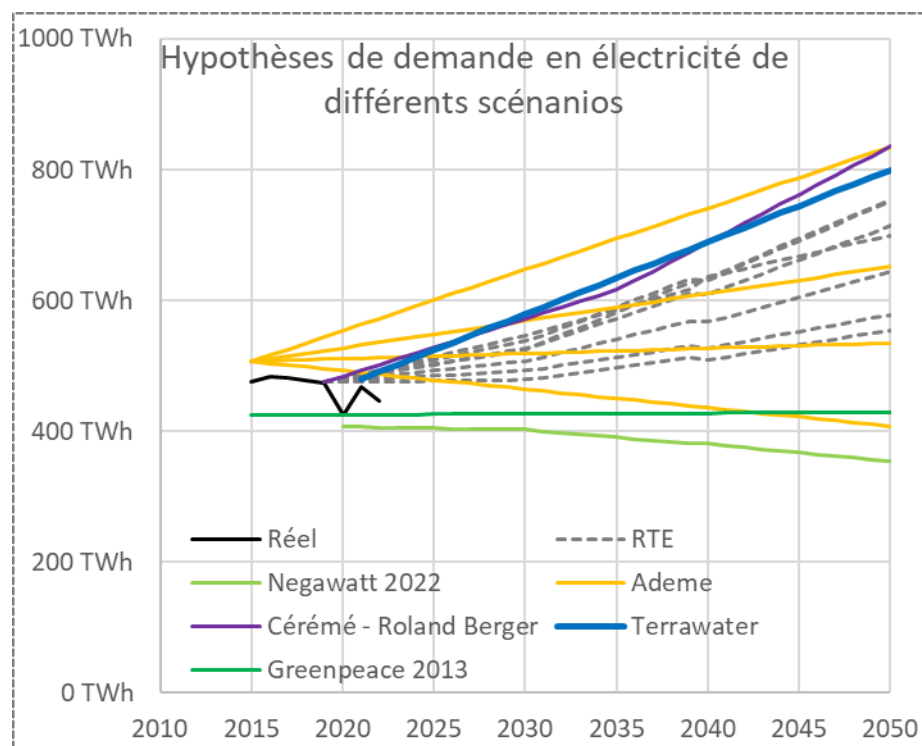
La production d'électricité ne fait pas un scénario énergétique complet... mais elle a un rôle majeur et structurant !



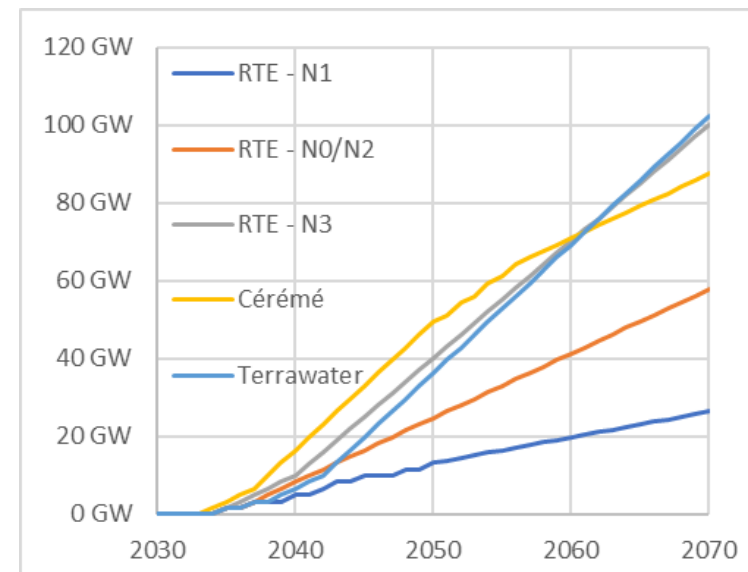
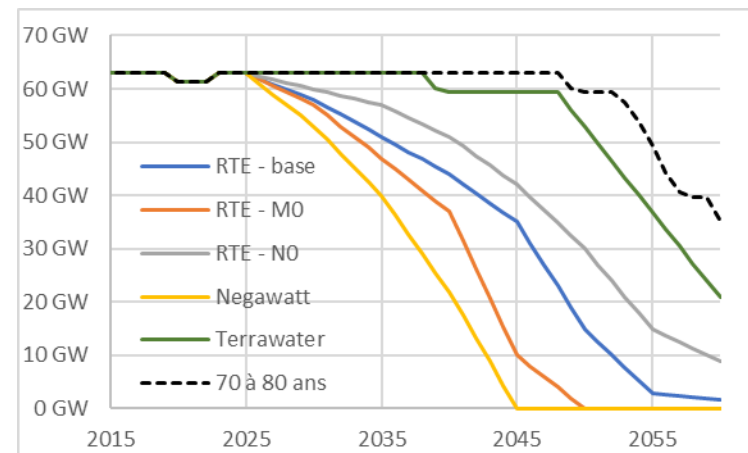
## Consommation et nucléaire : 2 facteurs structurants

Des hypothèses sur 3 facteurs ayant un impact majeur sur les besoins en électricité :

- Hypothèses de la demande future en électricité (+105% entre le scénario bas ADEME et le scénario haut ADEME)
- Prolongation du parc nucléaire historique (15 → 53 GW, voire 0 dans un scénario de sortie, et plus dans un scénario 80 ans),
- Capacité de construction d'un nouveau parc nucléaire



Demande ADEME1/4 + construction « RTE central »  
+ durée de vie entre « RTE central » et 80 ans :  
Nucléaire : 34% → 153% des besoins en 2050





## Quel est l'objectif recherché ?

### Quels objectifs assigner à des mix électriques ?

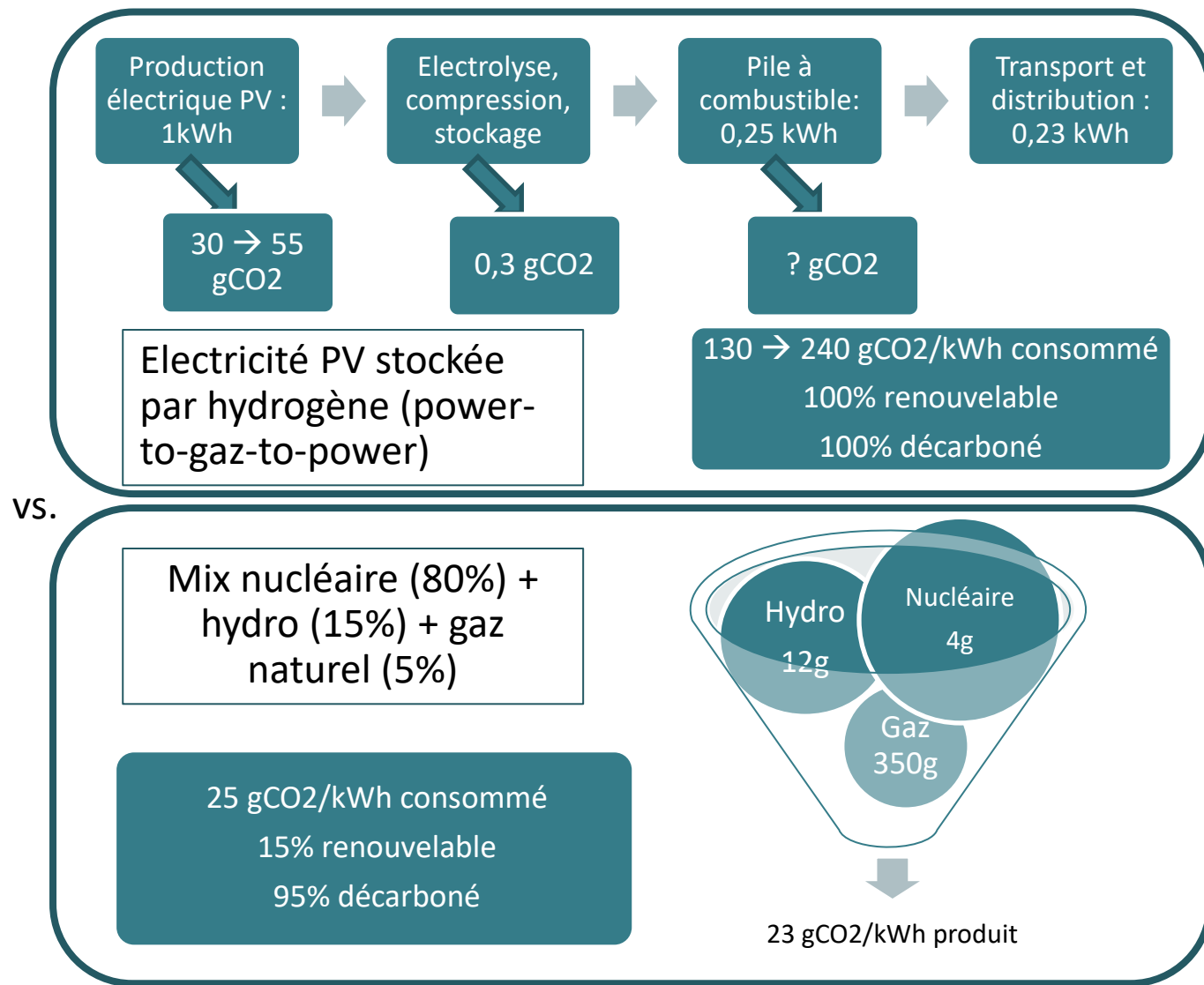
- Taux d'énergies renouvelables ?
- Taux d'énergies décarbonées ?
- Taux d'émissions moyen de l'énergie produite ?
- Taux d'émissions moyen de l'énergie consommée ?
- Coût du CO<sub>2</sub> évité ?
- Taux d'artificialisation ?

**Enjeu du 100% décarboné :** Comment assurer l'approvisionnement pendant les quelques semaines de vague de froid hivernales + anticyclone ?

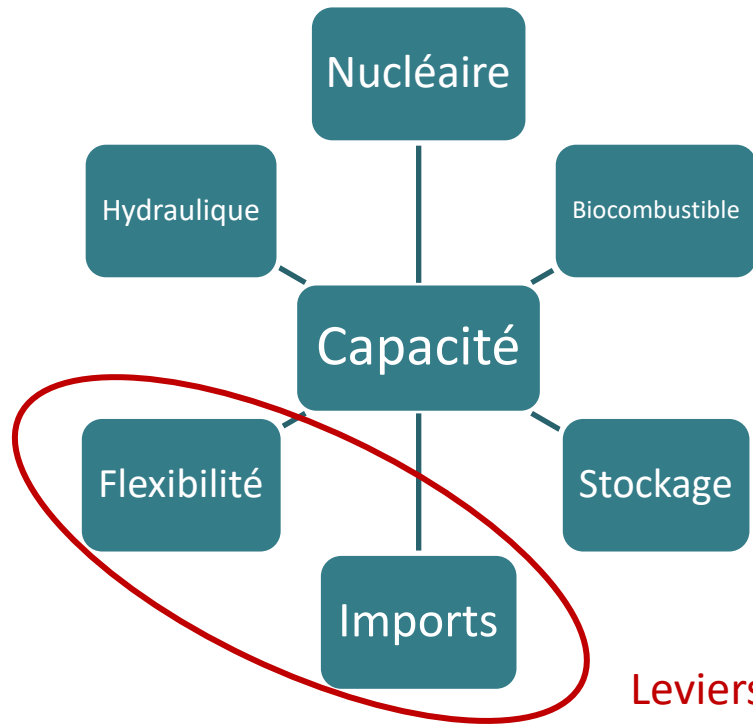
Aujourd'hui :

- Froid → neige → peu de débit dans les rivières
- Anticyclone → pas de vent
- Hiver → peu de soleil
- Nucléaire déjà au maximum

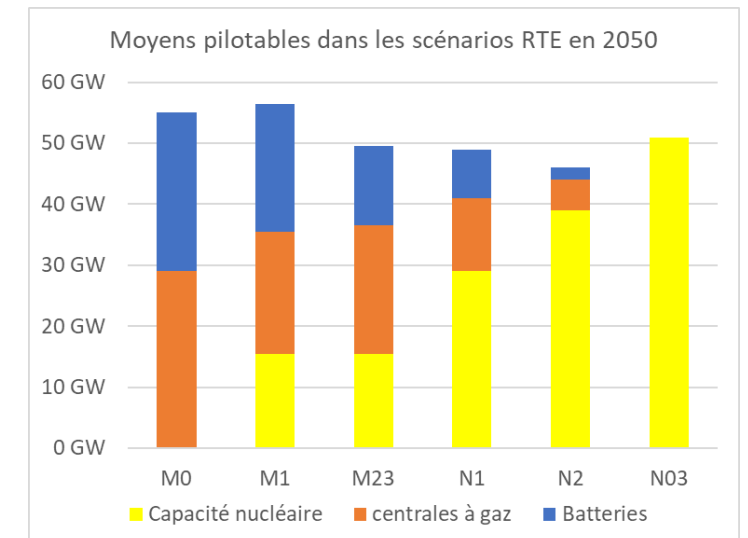
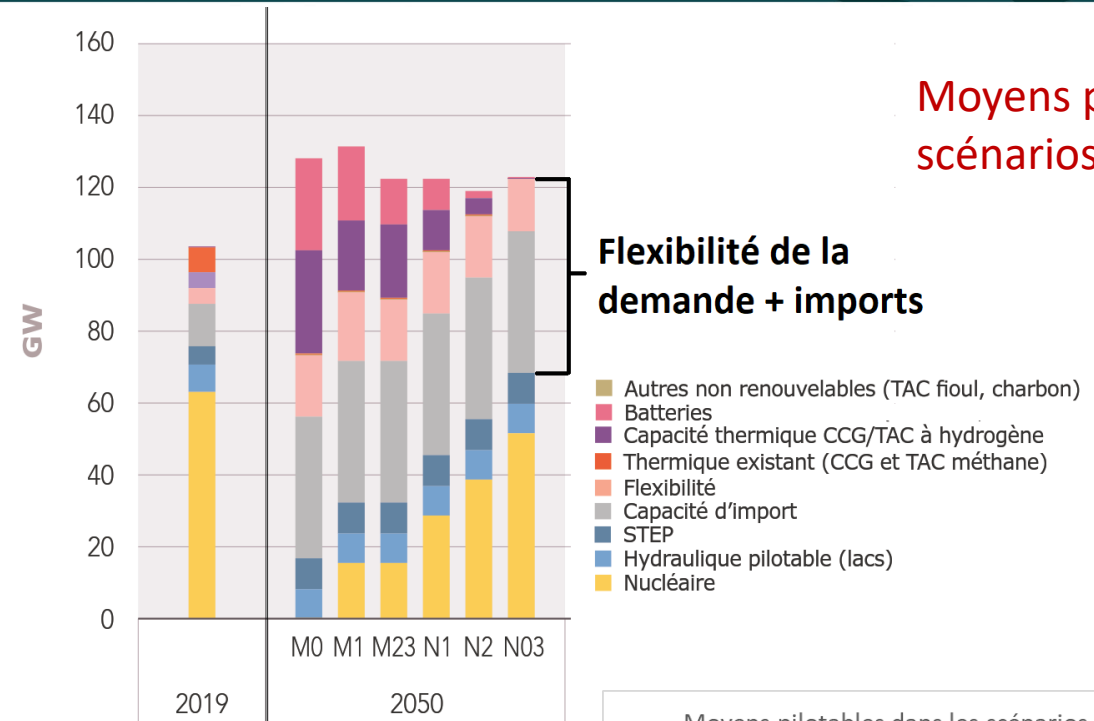
**Les derniers % de fossiles seront les plus difficiles à supprimer...**



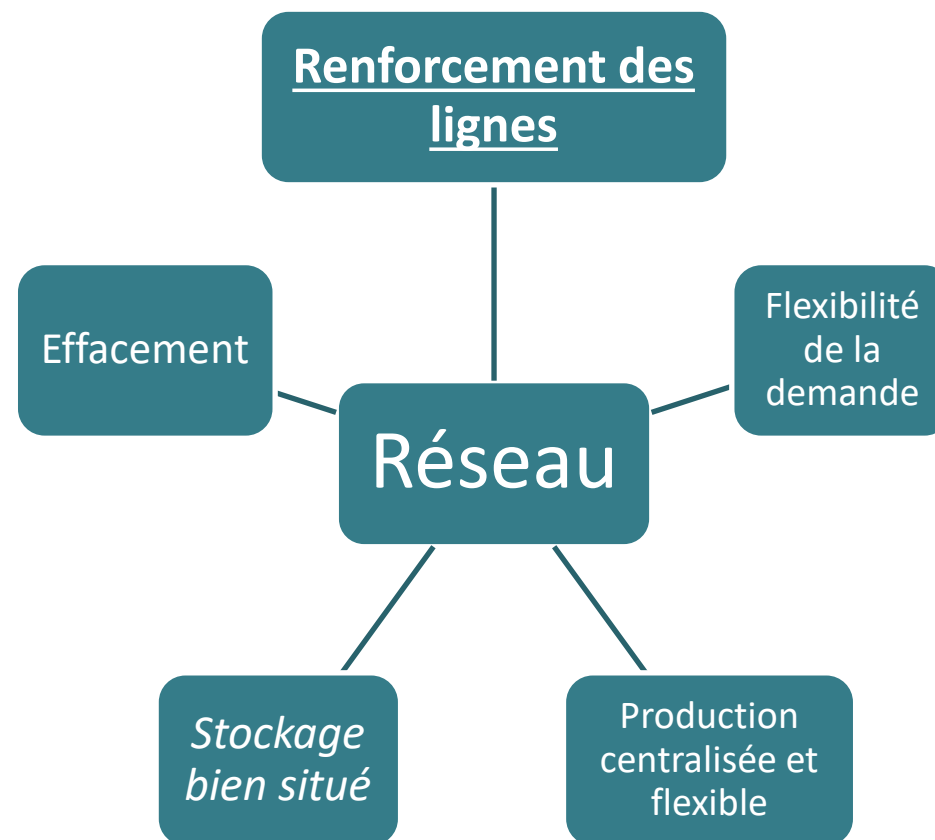
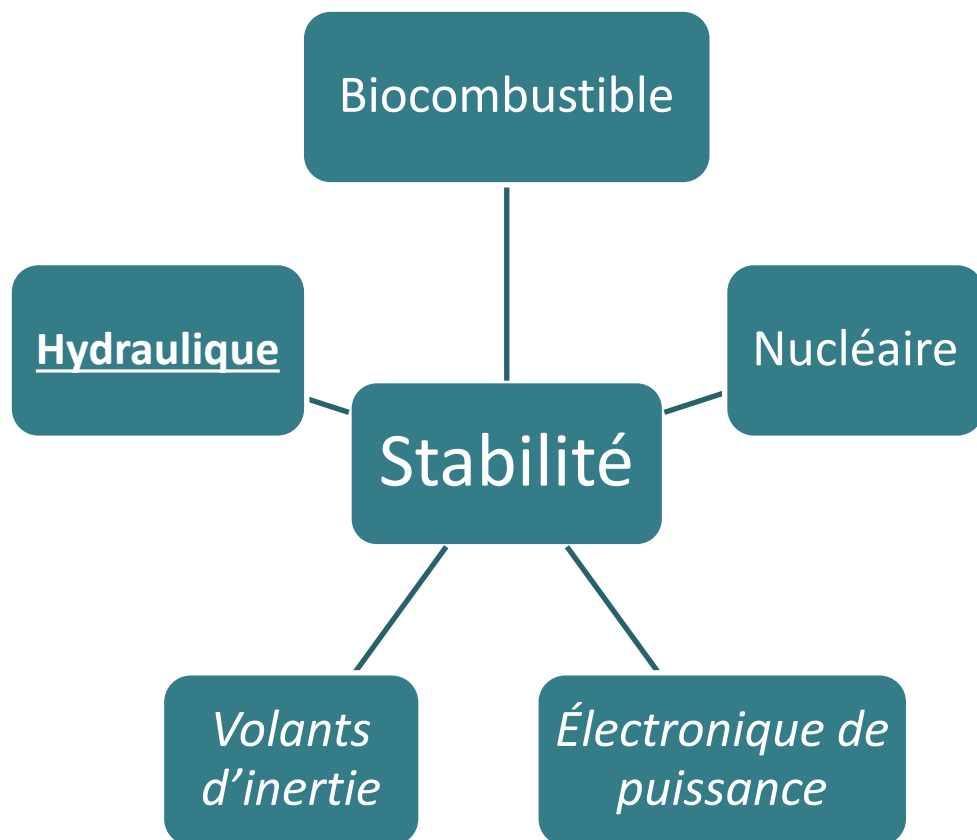
## Enjeu n°1 : L'équilibrage (nécessité d'énergies flexibles)



Leviers non utilisés  
dans le scénario  
Terrawater



## Les autres enjeux clés trop souvent oubliés...



## Tous les scénarios reposent sur des paris, de nature et d'ampleur différentes

### Des défis technologiques

- Stabilité du réseau avec peu de machines tournantes
- Eolien offshore flottant (fonds marins profonds en France)
- Filière hydrogène, avec des électrolyseurs fonctionnant par intermittence
- Prolongement du parc nucléaire actuel après 70 ans

### Des défis sociaux

- Sobriété
- Flexibilité de la demande
- Acceptabilité des nouvelles centrales (nucléaire, éolien, STEP...)
- Acceptabilité des nouvelles lignes HT
- Rapidité des décisions politiques
- Montée en puissance des compétences

### Des défis industriels

- Construction accélérée de réacteurs nucléaires
- Construction accélérée d'éoliennes
- Construction accélérée de panneaux PV
- Construction d'un grand nombre de STEP

### Des défis géopolitiques

- Capacité de nos voisins à conserver une production électrique stable (et allant vers du bas-carbone)
- Bonne entente avec nos voisins, et absence de menaces de coupure du courant.
- Approvisionnement en matières premières critiques et dépendance technologiques

## Tous les scénarios reposent sur des paris

### Nature du pari (et probabilité)

- Technologique
- Social
- Industriel
- Géopolitique

### Conséquence en cas d'échec du pari

- Retard pour atteindre un mix très bas carbone (surtout risques industriels)
- Impossibilité de poursuivre la décarbonation (surtout risques sociaux et technologiques)

### Possibilité du scénario de passer à un plan B

- Quand se rendra-t-on compte si les paris sont gagnables ou pas ?
- Sera-t-il encore temps (industriellement) de lancer un plan B ?

### Scénario « zéro pari » :

Pas de révolution technologique (hydrogène, stabilité du réseau, offshore flottant), flexibilité limitée de la demande, capacités industrielles limitées, etc.

➔ Impossible de boucler un scénario

➔ Gaz + charbon

### Concevoir un scénario robuste

1°) Ne rien s'interdire à priori

2°) Ne pas faire de paris technologiques ou industriels non éprouvés

3°) Vérifier la possibilité de marges ou de « plans B » si les hypothèses les plus optimistes ne sont pas atteintes



## Quel risque à « courir tous les chevaux à la fois » ?

Principal risque : avoir un excédent d'énergie bas carbone... Ce problème a des solutions:

- Ne pas renouveler les EnR en fin de vie,
- Exports vers les voisins en moins bonne situation,
- Implantation d'industries électrointensives
- Etc.

*Il est plus facile de gérer l'abondance que la pénurie...*

## Une définition complète de la durabilité ?

Limiter

- Le niveau d'exposition envers l'extérieur
- La consommation de ressources critiques
- L'exposition aux variations de la situation politique et économique interne  
... en plus de l'impact sur l'environnement

## Priorité aux infrastructures à forte inertie temporelle ?

Miser sur les infrastructures à forte inertie temporelle n'empêche pas d'ajuster plus tard avec des infrastructures déployables plus rapidement

## Pourquoi pas un scénario avec points d'étape ?

Prévoyant la possibilité de bifurquer dans une direction ou une autre en fonction de l'atteinte d'objectifs intermédiaires...

*C'est un moyen de ne pas préempter totalement le choix des générations futures...*

# Partie 2-2

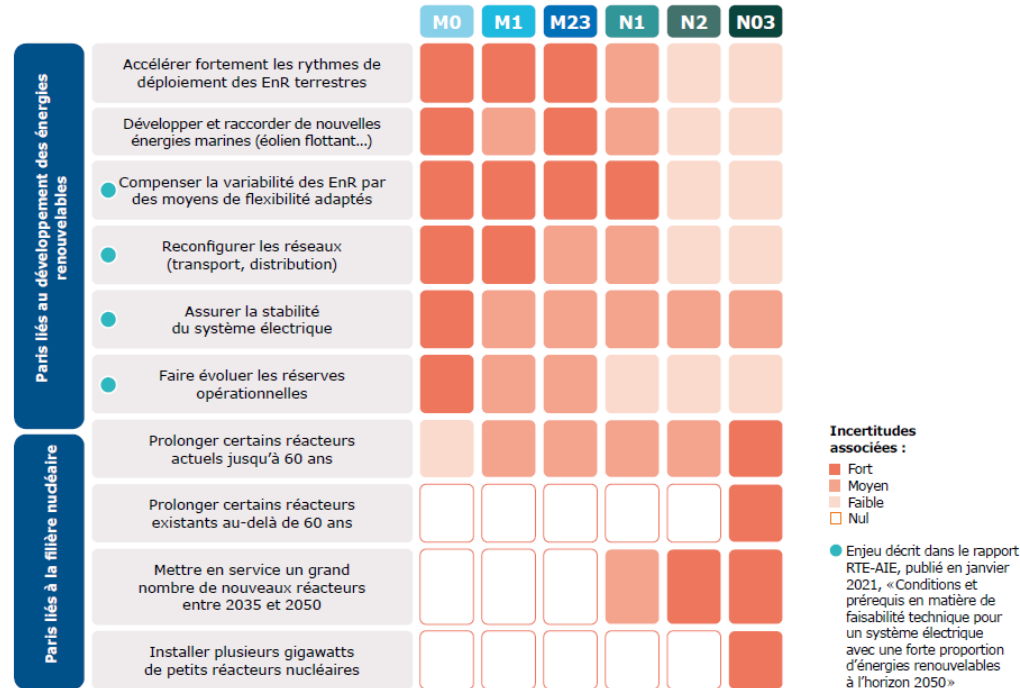
## Les points forts du scénario TerraWater

« Lorsque l'on s'attend toujours au pire, on ne peut être qu'agréablement surpris »

---

## Aucun pari technologique, des paris industriels limités

Figure 7.58 Prérequis technologiques et industriels associés aux différents scénarios et incertitudes

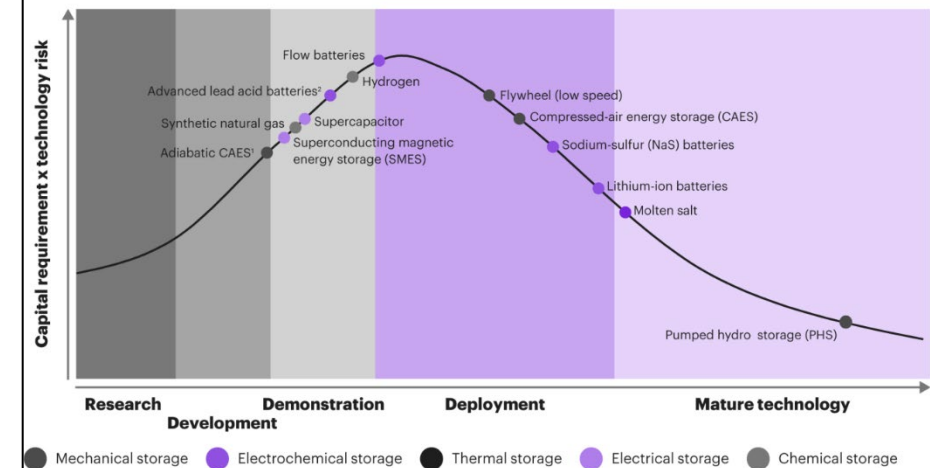


- Aucune technologie qui n'ait pas aujourd'hui atteint un TRL9
  - STEP
  - Réacteurs à eau pressurisée
  - Éolien terrestre/offshore
  - Solaire PV sol/toiture/flottant
  - Turbines à combustion à combustibles liquides

Figure 3

Electricity-storage technologies are at very different levels of maturity, but many face significant risk and extensive capital requirements

Technology maturity curve



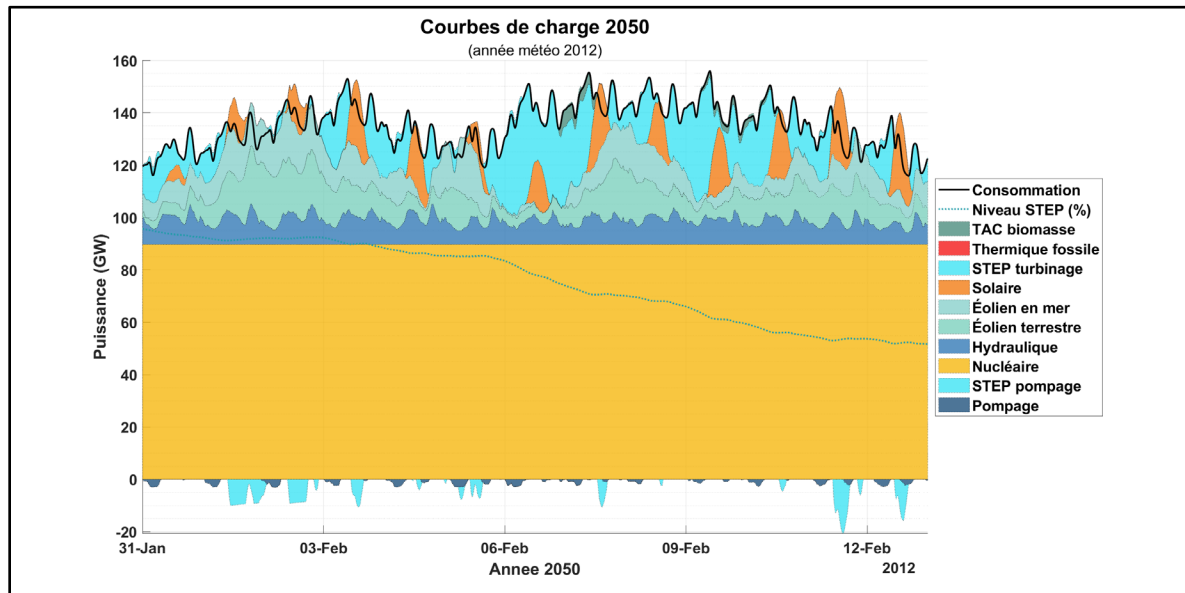
CAES is compressed-air energy storage.

\* Valve regulated lead acid batteries is a mature technology.

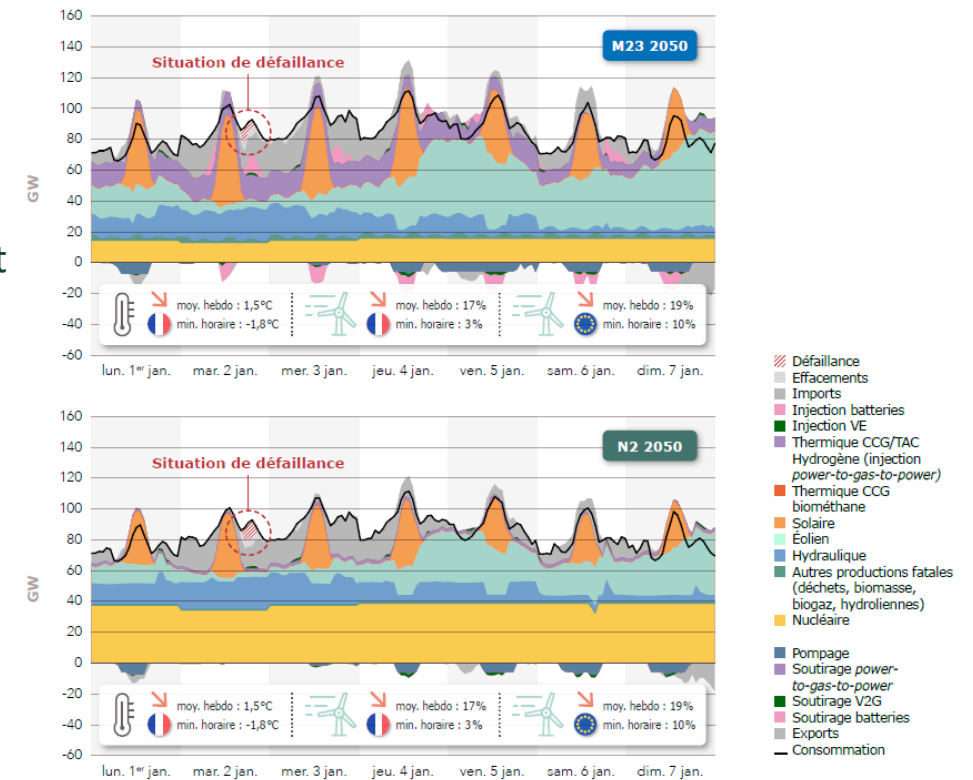
Source: A.T. Kearney Energy Transition Institute analysis

## Meilleure sécurité d'approvisionnement et meilleure souveraineté et coût global contenu

- RTE2050 : imports strictement nécessaires >3% du temps (~1 heure par jour)
- Puissance pilotable = 110% de la consommation de pointe
- La production annuelle bénéficie de 10% d'excédant brut
- Possibilité de découpler les imports des périodes de tension grâce aux STEPs
- Point de vigilance sur l'année 2042 : année la plus critique car celle présentant la plus grosse part d'EnR

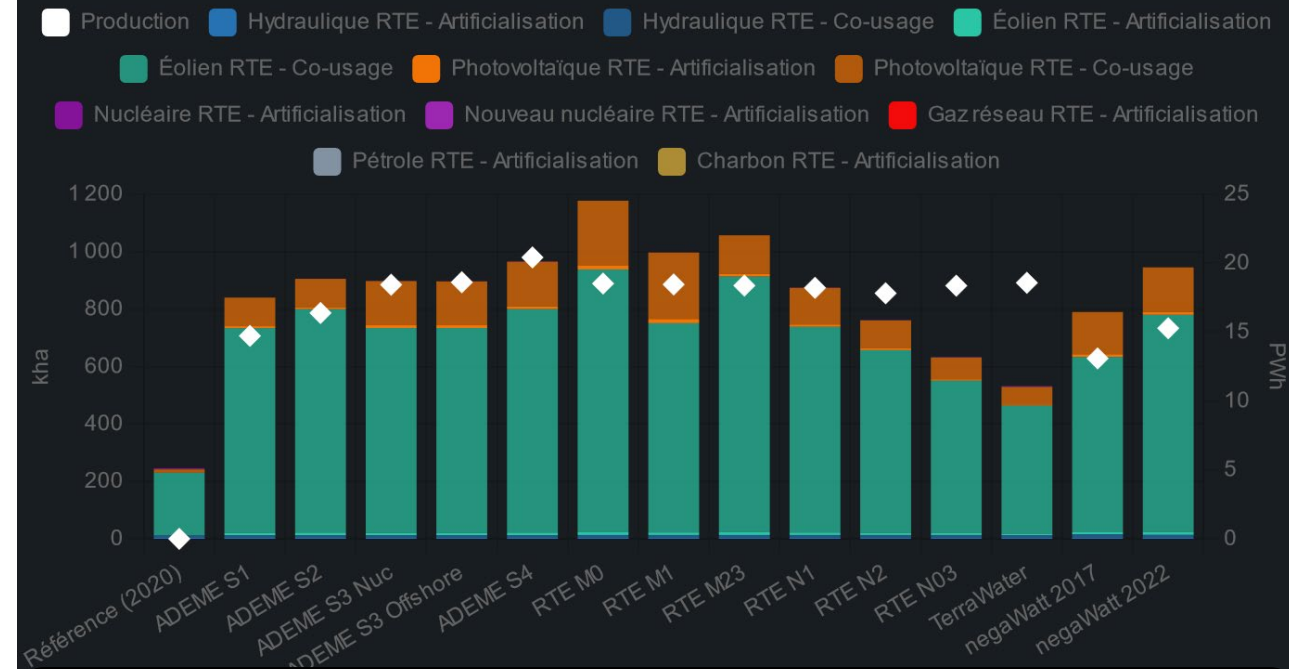


**Figure 8.26** Fonctionnement du système électrique lors d'une conjonction d'aléas de température basse et de vent faible en 2050

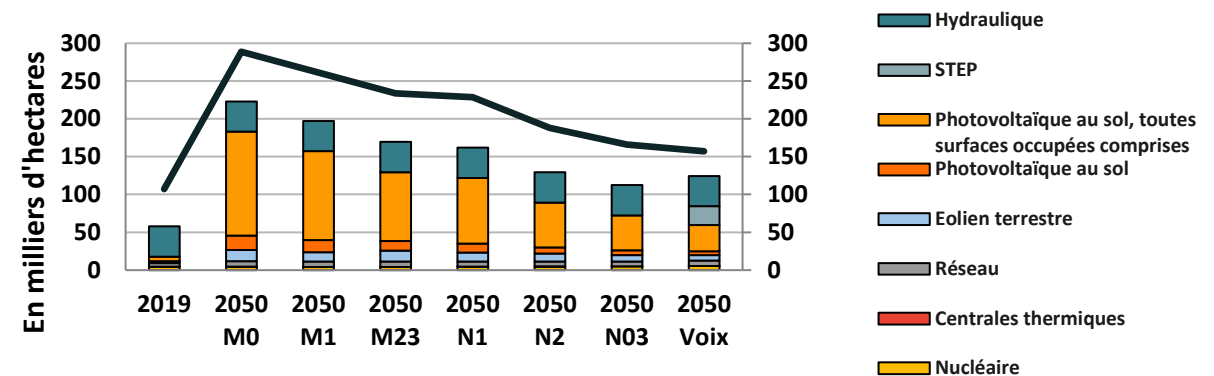


## Empreinte au sol inférieure

- Malgré la forte utilisation des STEP, l'empreinte au sol de TerraWater reste contenue en comparaison des autres scénarios
- En réalité, les STEPs ne représentent pas une si grande surface que ça en comparaison du Photovoltaïque par exemple



## Artificialisation et emprise au sol en 2019 et en 2050 dans les scénarios de RTE + Voix



## Un scénario prudent sur la biomasse

- Beaucoup d'usages sont très difficilement voire physiquement non électrifiables
- Ils nécessitent des carburants chimiques
- Électrifier le plus possible le reste de l'économie garantit que le gisement de biomasse sera suffisant pour couvrir ces usages
- De plus, la ressource en biomasse est vulnérable au changement climatique et son usage est source d'une forte pollution de l'air (cas du bois)



Aviation :  
**80 TWh/an**



Marine marchande :  
**20 TWh/an**

**190 TWH/AN DE  
BIOMASSE ÉNERGÉTIQUE  
NÉCESSAIRE**



Engins agricoles :  
**40 TWh/an**



Armée :  
**~10 TWh/an**



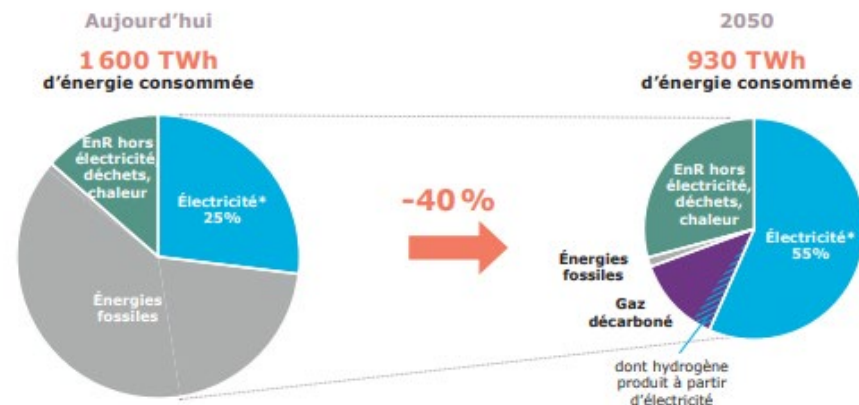
Chauffage résiduel :  
**40 TWh/an**



## Un scénario qui n'est pas plus énergivore

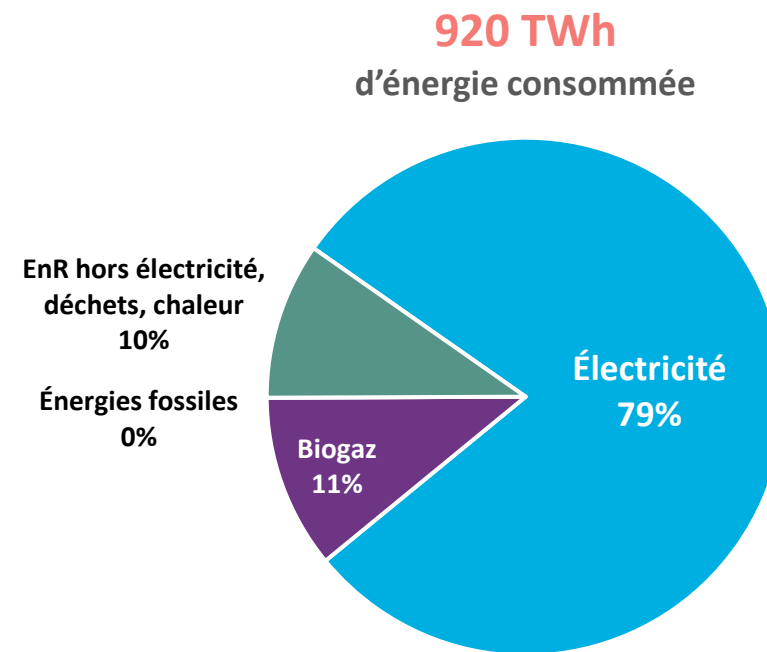
- Le recours accru à l'électrification directe permet d'obtenir une consommation d'énergie finale légèrement inférieure à celle de la SNBC.
- Ce gain est particulièrement important dans les secteurs du chauffage (pompe à chaleur) et du transport routier (électrification des camions).
- Cela illustre l'impact des convention comptables dans le domaine de l'énergie.

Figure 1.2 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 intérieure d'électricité dans la trajectoire de référence de RTE = 645 TWh

Consommation d'énergie finale dans le scénario TerraWater en 2050



# Partie 3-1

## **STEP et stockage d'électricité: considérations économiques**

Démonstration qui auraient été encore plus édifiante si nous l'avions abordée sous l'angle  
environnemental

---

## Quels types de besoins en stockage ?

| Type de stockage   | Puissance | Energie    |
|--------------------|-----------|------------|
| inter-annuel       | 2 GW      | 20 000 GWh |
| inter-saisonnier   | 10 GW     | 30 000 GWh |
| inter-hebdomadaire | 15 GW     | 10 000 GWh |
| intra-hebdomadaire | 8 GW      | 500 GWh    |
| intra-journalier   | 8 GW      | 50 GWh     |

### Moss Landing battery

0,4 GW / 1,6 GWh



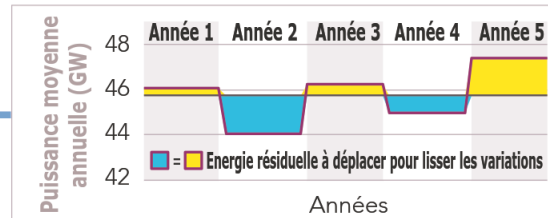
### Snowy 2.0

2 GW / 350 GWh



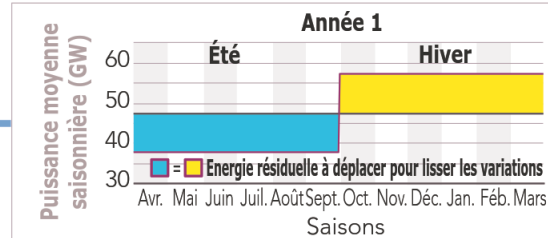
Années plus ou moins froides, pluvieuses, etc.

Modulation  
inter-annuelle



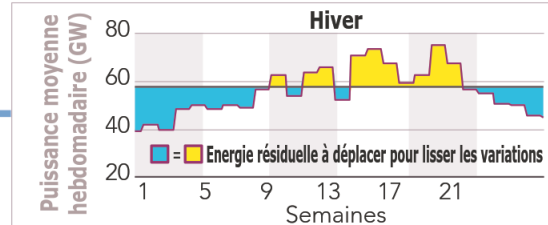
Chauffage, éclairage

Modulation  
inter-saisonnière



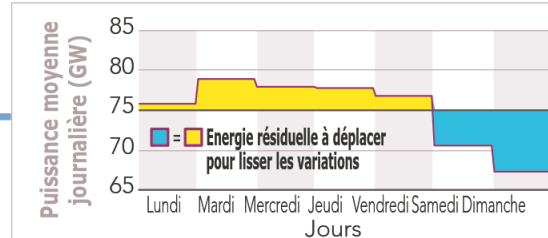
Canicules / vagues de froid / anticyclones / etc.

Modulation  
inter-hebdomadaire



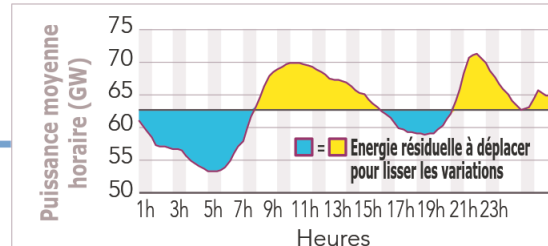
Effet semaine / WE

Modulation  
inter-hebdomadaire



Consommations variables (cuisson, nuit) / production solaire (jour/nuit)...

Modulation  
intra-journalière



## Combien coûte le stockage ?

### STEP

- Puissance (usine et chemin d'eau) :

Coût dépend de la distance entre les réservoirs, du caractère souterrain ou non, de la géologie... et des équipements

Coût : typiquement de l'ordre de 2000 €/kW (très variable)

- Energie = Volume réservoirs x différence de hauteur

Aucun lien entre le coût d'un barrage et le volume stocké... et encore moins avec l'énergie stockée.

A l'extrême, le coût du m<sup>3</sup> = 0 pour un réservoir naturel ou pré-existant !

### Batteries

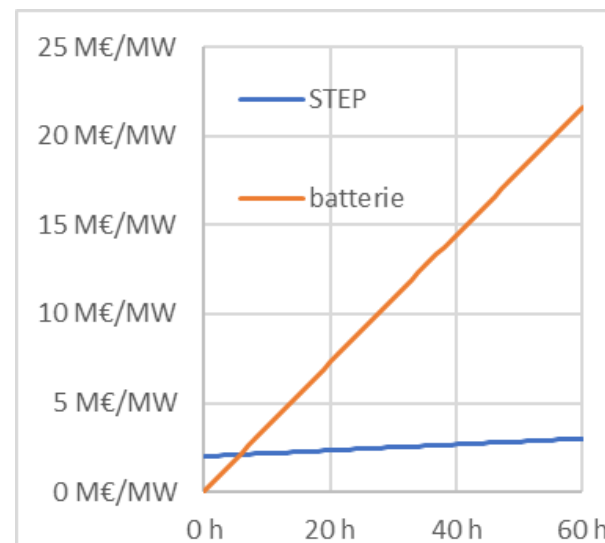
- Puissance (onduleur, poste électrique) :

Coût : de l'ordre de 55 €/kW (très variable)

- Energie (batteries, modules, refroidissement, protection incendie...) :

Coût : de l'ordre de environ 360 €/kWh

Coût de l'onduleur marginal pour des durées de quelques heures (Cste de temps de 4h → 3,4 % des coûts)



**Batteries** : coût fonction de l'énergie stockable

**STEP** : coût surtout fonction de la puissance (très variable pour l'énergie)

## Combien vaut le stockage ?

En « energy-only » (pas de marché de capacité, de prix garantis...), hors pertes de rendement :

Valeur du stockage = {MWh produits / an} x {écart entre prix en période creuse et en période de pointe}.

La valeur du MW de puissance dépend du **nombre d'heures de production** (facteur de charge)

La valeur du MWh stocké dépend du nombre de fois où ce MWh pourra être stocké et déstocké.

| Type de stockage   | Puissance | Energie    | Nombre cycles /an | Durée cycle |
|--------------------|-----------|------------|-------------------|-------------|
| interannuel        | 2 GW      | 20 000 GWh | 0,25              | 8000 h      |
| inter-saisonnier   | 10 GW     | 30 000 GWh | 1                 | 2000 h      |
| inter-hebdomadaire | 15 GW     | 10 000 GWh | 5                 | 400 h       |
| intra-hebdomadaire | 8 GW      | 500 GWh    | 50                | 40 h        |
| intra-journalier   | 8 GW      | 50 GWh     | 500               | 4h          |

*Nota : le facteur de charge réel des STEP est plus faible que ce qu'on peut déduire de ce tableau (1/3 de moins), en raison d'une part du mélange des horizons de temps, d'autre part des pertes de rangement.*

### Batteries :

Coût dépend du MWh → maximiser nombre de cycles charge / décharge.  
→ Rentabilité possible seulement pour des cycles intrajournaliers

### STEP :

Tant que le coût du MWh (=réservoirs) reste faible → rentabilité possible avec des constantes de temps élevées.

## Quelle puissance pour une STEP ?

En réalité, il est intéressant de sur-équiper les STEP :

- ➔ pour choisir précisément les instants où le différentiel de prix est le plus important (en mélangeant plusieurs échéances de durée).
- ➔ Car le stockage marginal peut avoir un coût important.

Plus on prévoit de fortes capacités de stockage :

- ➔ plus on peut augmenter la constante de temps,
- ➔ Plus le coût de la capacité de stockage est faible
- ➔ Moins la valeur marginale du stockage sera importante.

| Capacité totale de stockage     | Puissance totale requise | Constante de temps |
|---------------------------------|--------------------------|--------------------|
| inter-hebdomadaire - 10 000 GWh | 31 GW                    | 300 h              |
| intra-hebdomadaire - 500 GWh    | 16 GW                    | 30 h               |
| intra-journalier - 50 GWh       | 8 GW                     | 6 h                |

### Exemple :

Si la capacité de stockage est de 2000 GWh, il sera impossible d'utiliser la pleine capacité des usines avec des constantes de temps de 20 h à 40h.

Aujourd'hui : 4,2 GW / 184 GWh

Moyenne : 44 h

TerraWater : 42 GW / 8340 GWh

Moyenne : 200 h



## Arbitrage : stockage / surcapacités flexibles (+ flexibilité demande & imports/exports)

Alternative au stockage : surdimensionner les moyens flexibles pour faire face au besoin intermittents.

Plus il y a de surcapacités, plus le facteur de charge de la dernière unité sera faible.

- Nucléaire = coût fixes → facteur de charge élevé uniquement
- Gaz (\*) = coûts variables → facteur de charge faible idéalement
- STEP : mal adapté pour les facteurs de charges trop élevés ou trop faibles → comble un trou

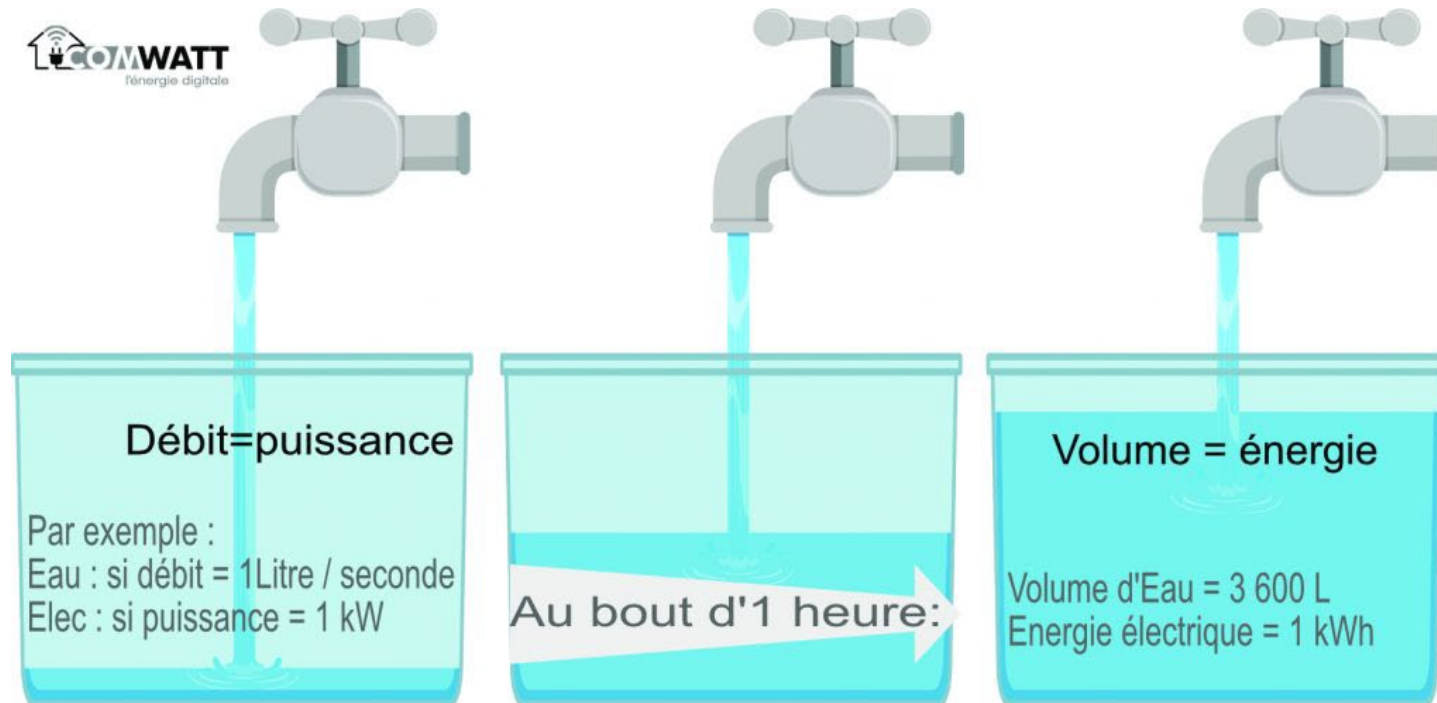
(\*) Gaz = nature / biogaz / de synthèse

| Durée              | Flexibilité | Batterie | STEP               | Nucléaire                        |
|--------------------|-------------|----------|--------------------|----------------------------------|
| interannuel        | limité      | Non      | Non sauf exception | Avec baisse de facteur de charge |
| inter-saisonnier   | limité      | Non      | Non sauf exception | Oui                              |
| inter-hebdomadaire | limité      | Non      | Oui<br>T=200/400h  | Avec baisse de facteur de charge |
| intra-hebdomadaire | limité      | Non      | Oui<br>T=20/40h    | Avec baisse de facteur de charge |
| intra-journalier   | Oui         | Oui      | Oui                | Avec baisse de facteur de charge |

**Coût des STEP acceptable, tant qu'ils sont plus économique que les production pilotables de réserve**

On peut surdimensionner par choix « de sécurité », pour faire face à tous types d'aléas (industriels, météo, etc.)

## Annexe



# Partie 3-2

## La place des STEPs dans le scénario TerraWater

*« Le meilleur moyen de stocker de l'hydrogène, c'est oxydé entre 2 flancs de vallées »*

---

## Quelques chiffres sur le stockage d'énergie en France

- Gaz naturel : ~136 TWh majoritairement en souterrain (soit 70 TWh électrique, ou qq TWh électriques via H2)
- Hydraulique de lacs : 3,591 TWh non réversibles
- STEP : 0,07~0,08 TWh de capacité réversible
- Batteries (y-c V2G) : négligeable

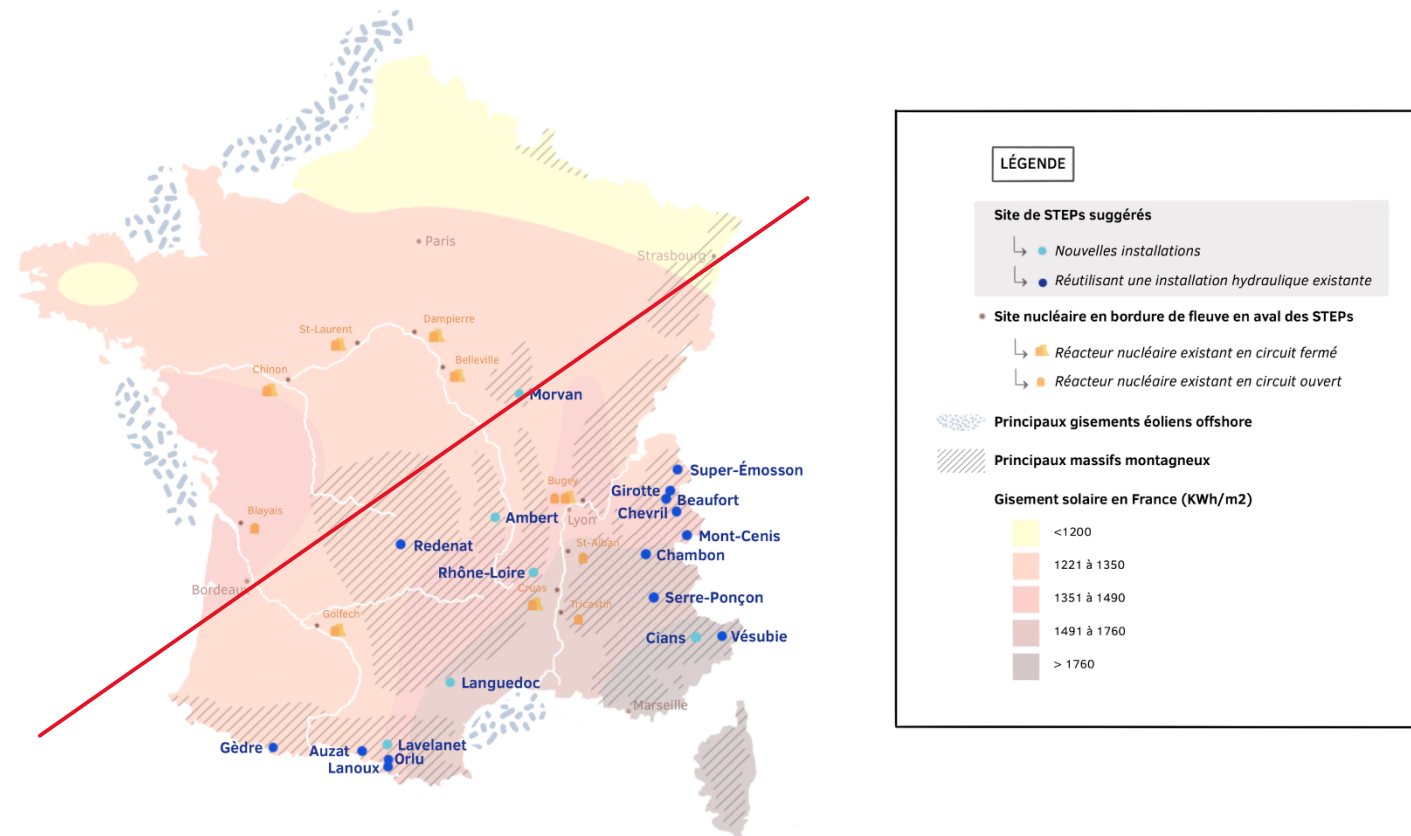
Objectif ? Multiplier la capacité des STEP d'un facteur 100.  
Comment ? En profitant des effets d'échelle inhérents à l'hydraulique.

Leurs caractéristiques principales sont résumées dans le tableau ci-dessous :

|                        | Montézic<br>MSI 1982 | Revin<br>MSI 1976 | G. Maison<br>MSI 1985 | S.Bissorte<br>MSI 1987 | La Coche<br>MSI 1977 | Le Cheylas<br>MSI 1979 | Total   |
|------------------------|----------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|---------|
| Puissance en turbine   | 910 MW               | 720 MW            | 1790 MW               | 730 MW                 | 330 MW               | 460 MW                 | 4940 MW |
| Puissance en pompe     | 870 MW               | 720 MW            | 1160 MW               | 630 MW                 | 310 MW               | 480 MW                 | 4170 MW |
| Nombre de pompes       | 4                    | 4                 | 8                     | 4                      | 2                    | 2                      |         |
| Constante de temps     | 40 h                 | 5 h               | 30 h                  | 5 h                    | 3 h                  | 6 h                    |         |
| Productible gravitaire | STEP pure            | STEP pure         | 216 GWh               | 250 GWh                | 426 GWh              | 670 GWh                |         |

## Un potentiel important mais cantonné au sud d'un axe Bordeaux/Strasbourg

Les STEP sont placées le plus proche possible des gisements solaires et éoliens, dans les limites topographiques qu'elles requièrent. Elles peuvent aussi bénéficier à la gestion du refroidissement de certains réacteurs nucléaires situés en aval du cours d'eau.

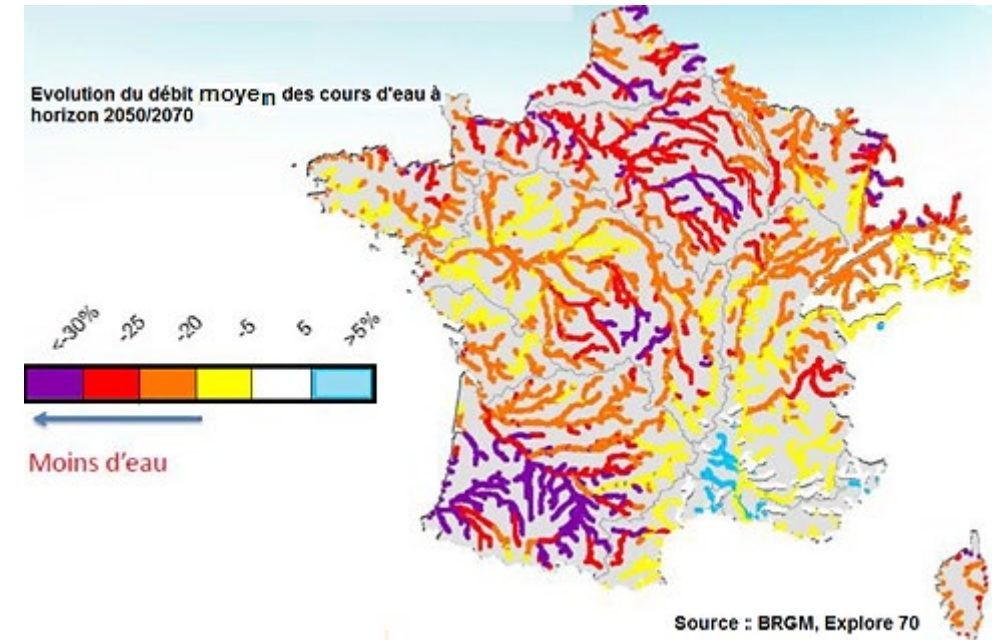


Une annexe traitant spécifiquement et dans le détail des sites sera publié en avril 2023.  
Merci de consulter le site internet ou suivre notre actualité sur les réseaux sociaux pour  
être informé

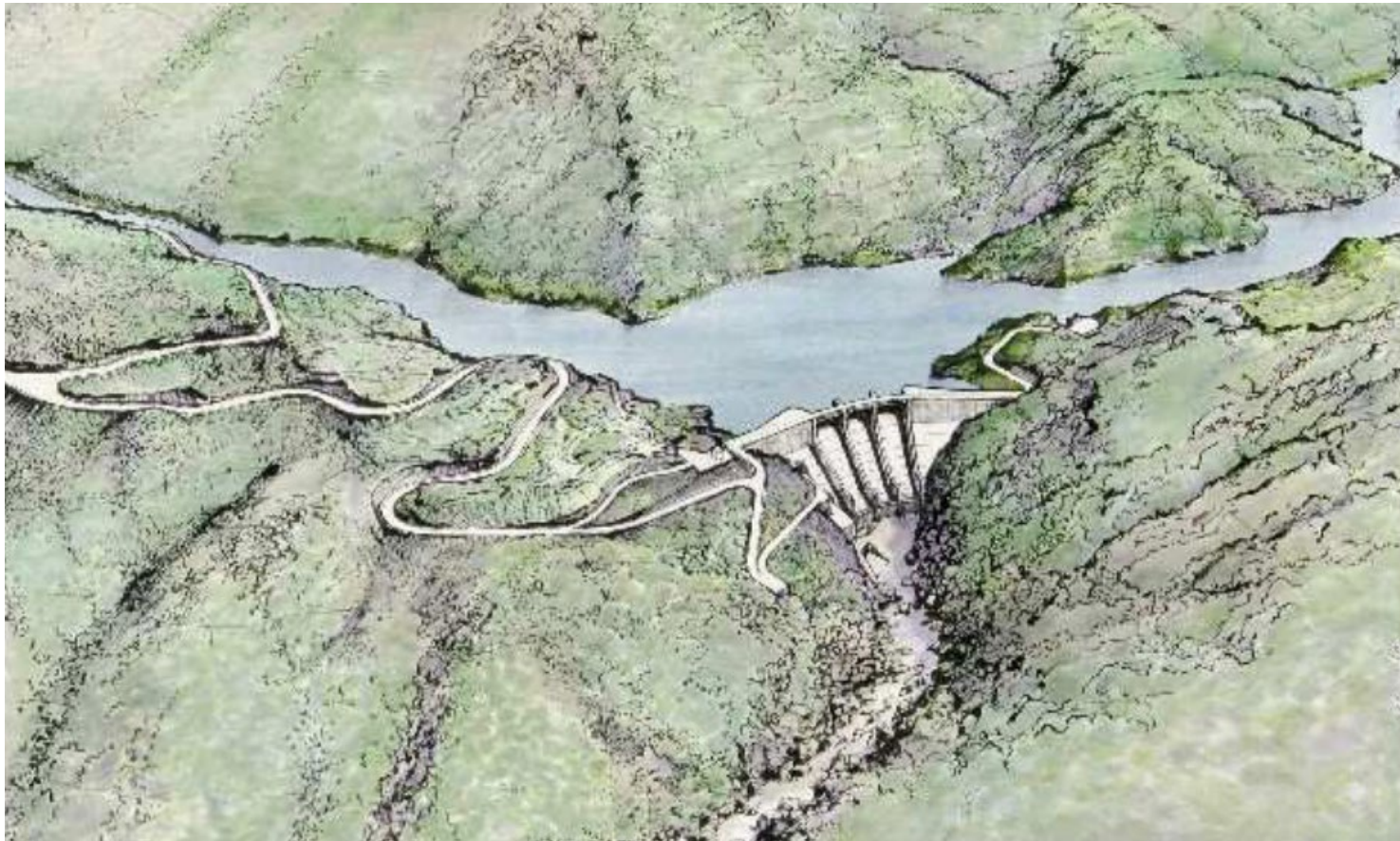


## La cerise sur le gâteau : les co-bénéfices

- Services systèmes pour le réseau (en particulier l'inertie)
- Le gouvernement commence à réfléchir à l'adaptation du pays à un monde à +4°C, c'est-à-dire un monde dans lequel il n'y aurait plus ni neige ni glaciers dans les Pyrénées.
- Dans ces conditions, disposer d'un stock d'eau de qq milliards de m<sup>3</sup> en tête du bassin de l'Adour-Garonne semble être un atout considérable.
- Soutien d'étiage pour les centrales nucléaires
- Tourisme
- Protection contre les inondations



## Merci de votre attention



Crédit: EDF, barrage de Rizzanèse, vue d'artiste