

Un système électrique 100 % renouvelable ?

Une faisabilité technique
désormais prouvée

Marc JEDLICZKA - Association négaWatt

Webinaire - 7 avril 2021



01.

Le scénario négaWatt 2017

- **Point de départ**
- **Bilan complet**
- **Bilan électrique détaillé**

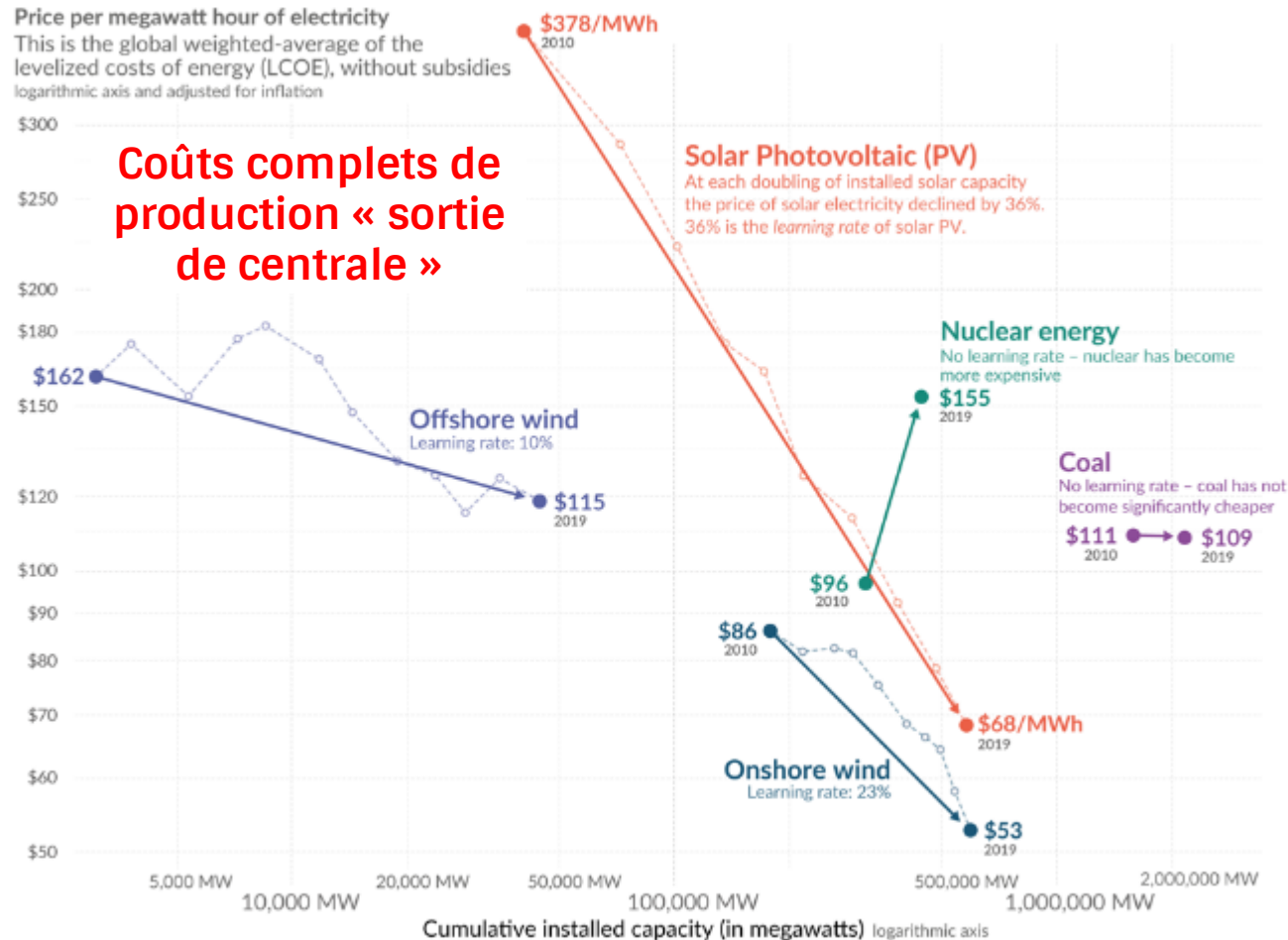
Des renouvelables toujours moins chères



<https://ourworldindata.org/cheap-renewables-growth>

Electricity from renewables became cheaper as we increased capacity – electricity from nuclear and coal did not

Our World
in Data



Source: IRENA 2020 for all data on renewable sources; Lazard for the price of electricity from nuclear and coal – IAEA for nuclear capacity and Global Energy Monitor for coal capacity. Gas is not shown because the price between gas peaker and combined cycles differs significantly, and global data on the capacity of each of these sources is not available. The price of electricity from gas has fallen over this decade, but over the longer run it is not following a learning curve.



02.

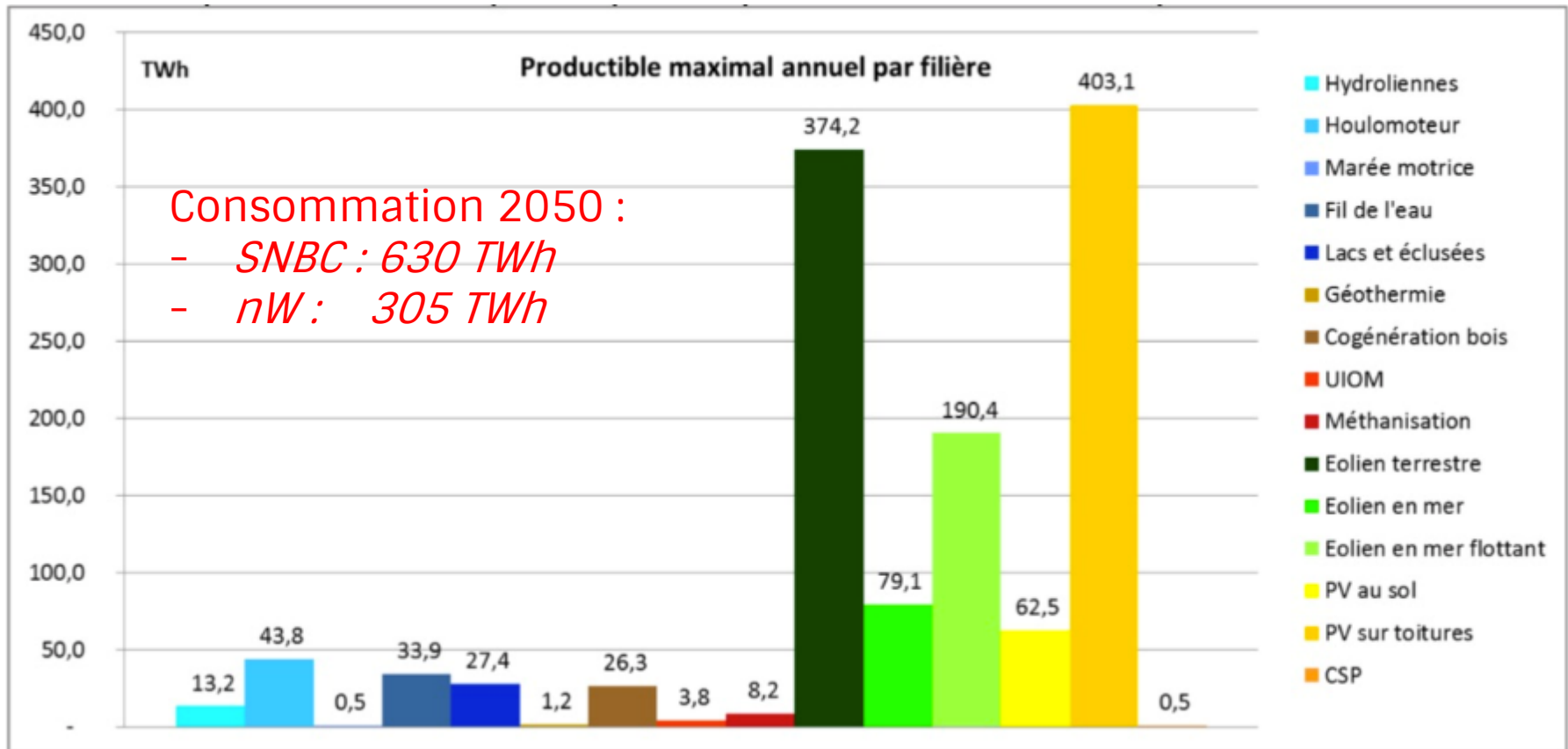
Les contraintes électriques

- **La sécurité d'approvisionnement**
- *L'équilibrage court terme*
- *Le synchronisme du réseau*

Productible d'électricité renouvelable



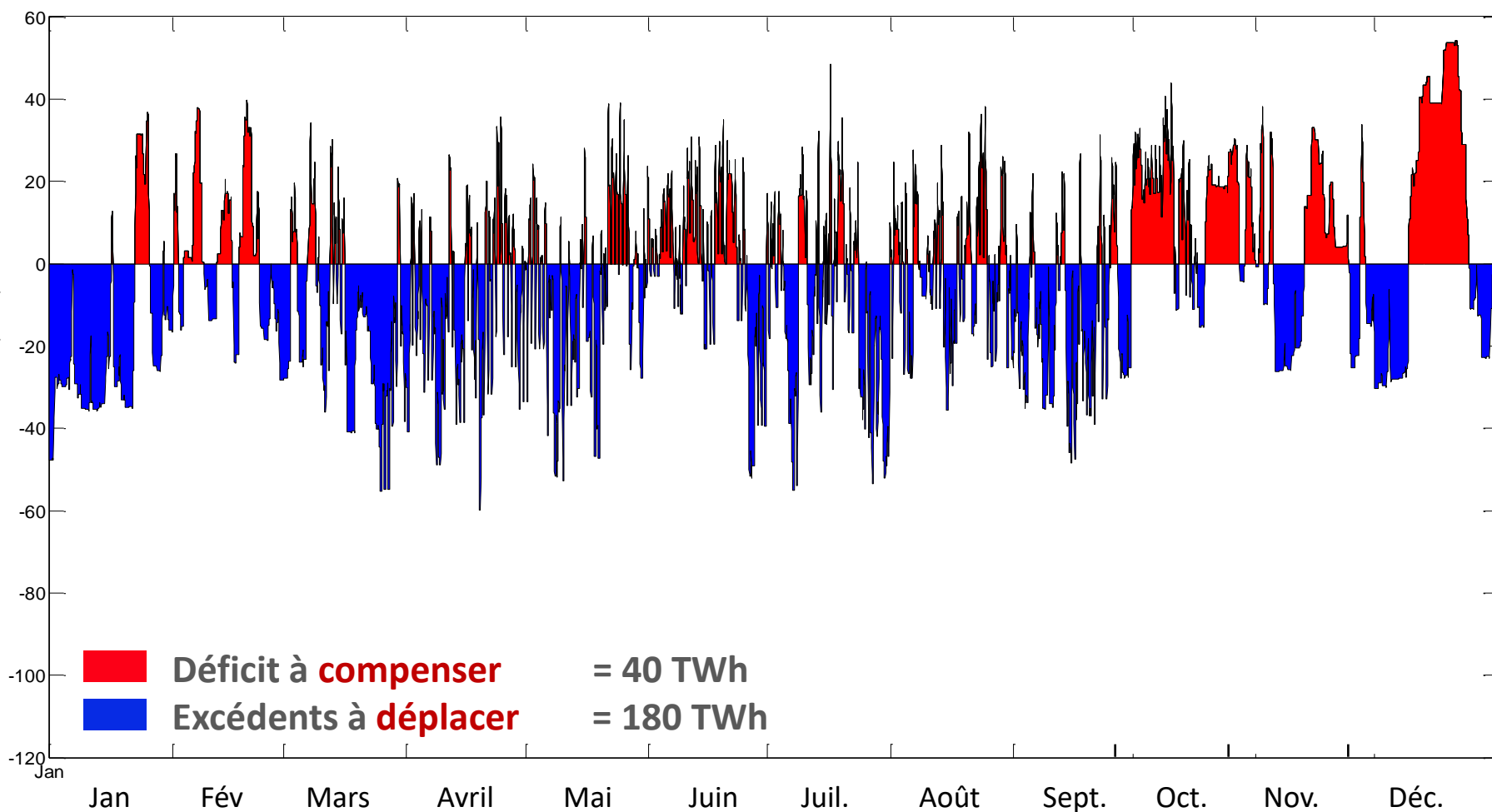
Total disponible : 1268 TWh



Source étude ADEME 2017

↘ Quels besoins de stockage ?

Équilibre offre/demande en puissance sur l'année

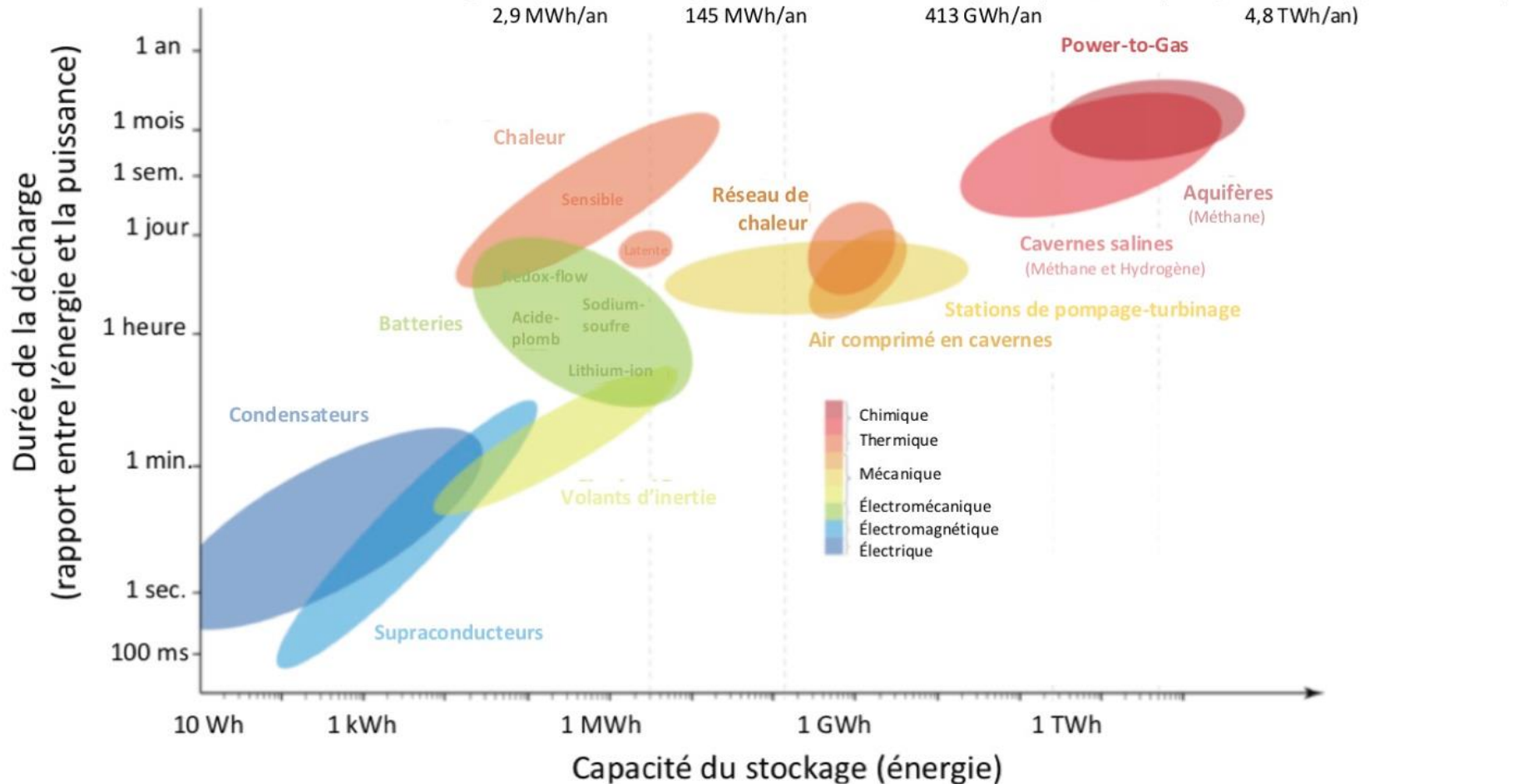


Les différentes technologies de stockage



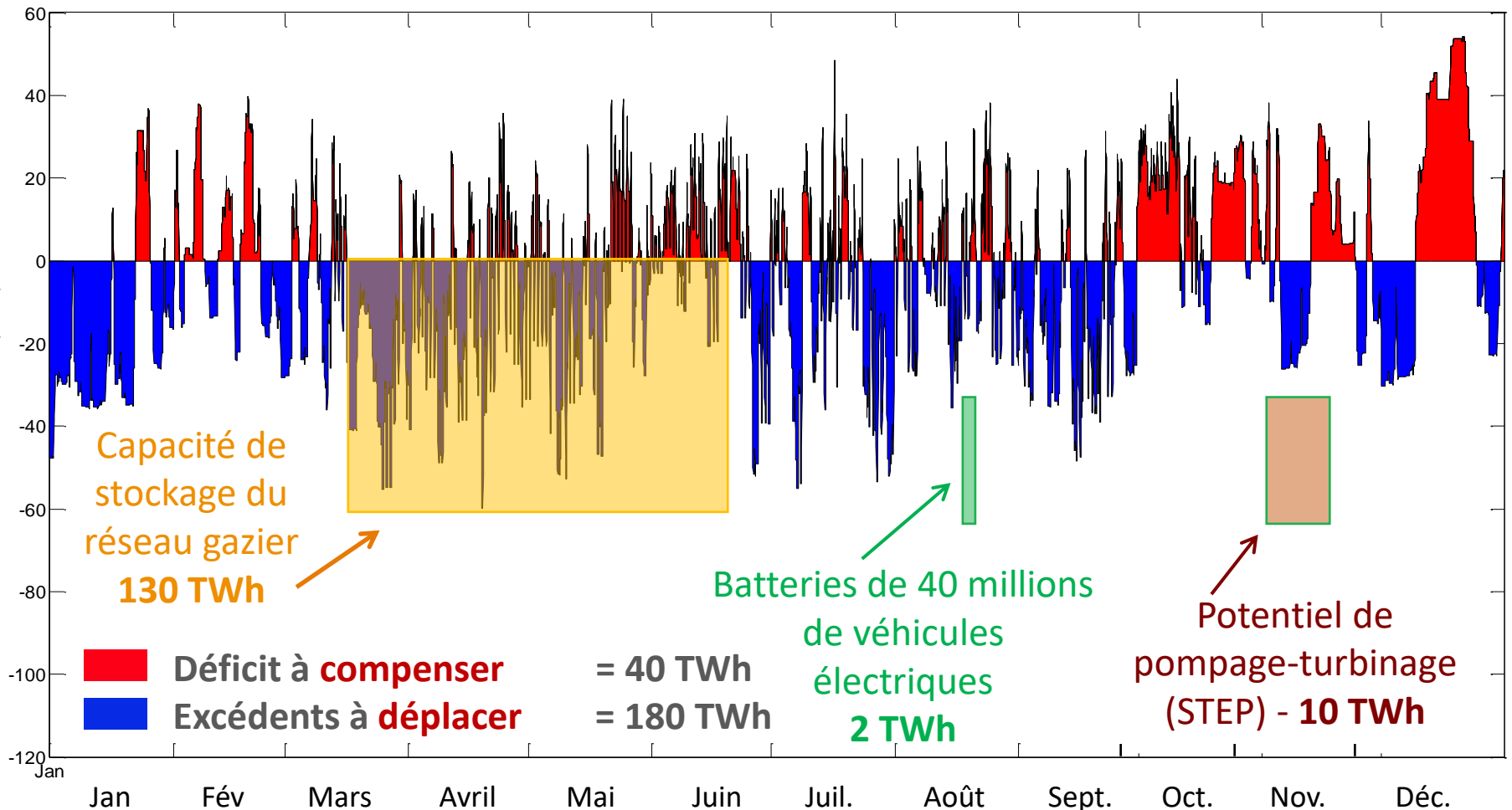
Consommation annuelle d'électricité du résidentiel pour :
(1,45 MWh/personne/an)

Ménage de 2 personnes 2,9 MWh/an Village de 100 hab. 145 MWh/an Ville de Montpellier (285 000 hab.) 413 GWh/an Région Bretagne (3,3 millions hab.) 4,8 TWh/an



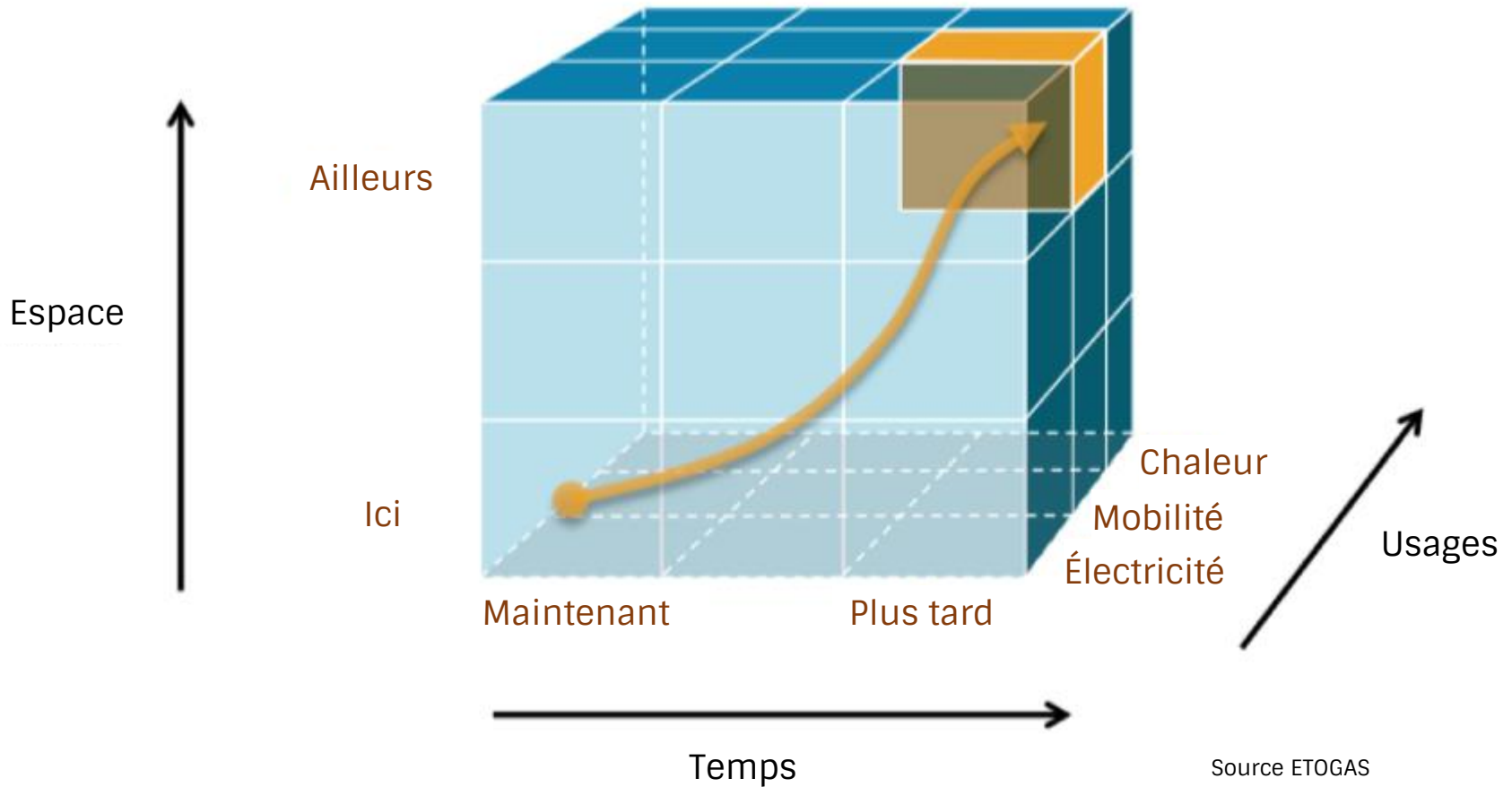
➤ Capacités de stockage par technologie

Équilibre offre/demande en puissance sur l'année



↘ La flexibilité “3D” du Power-to-Gas

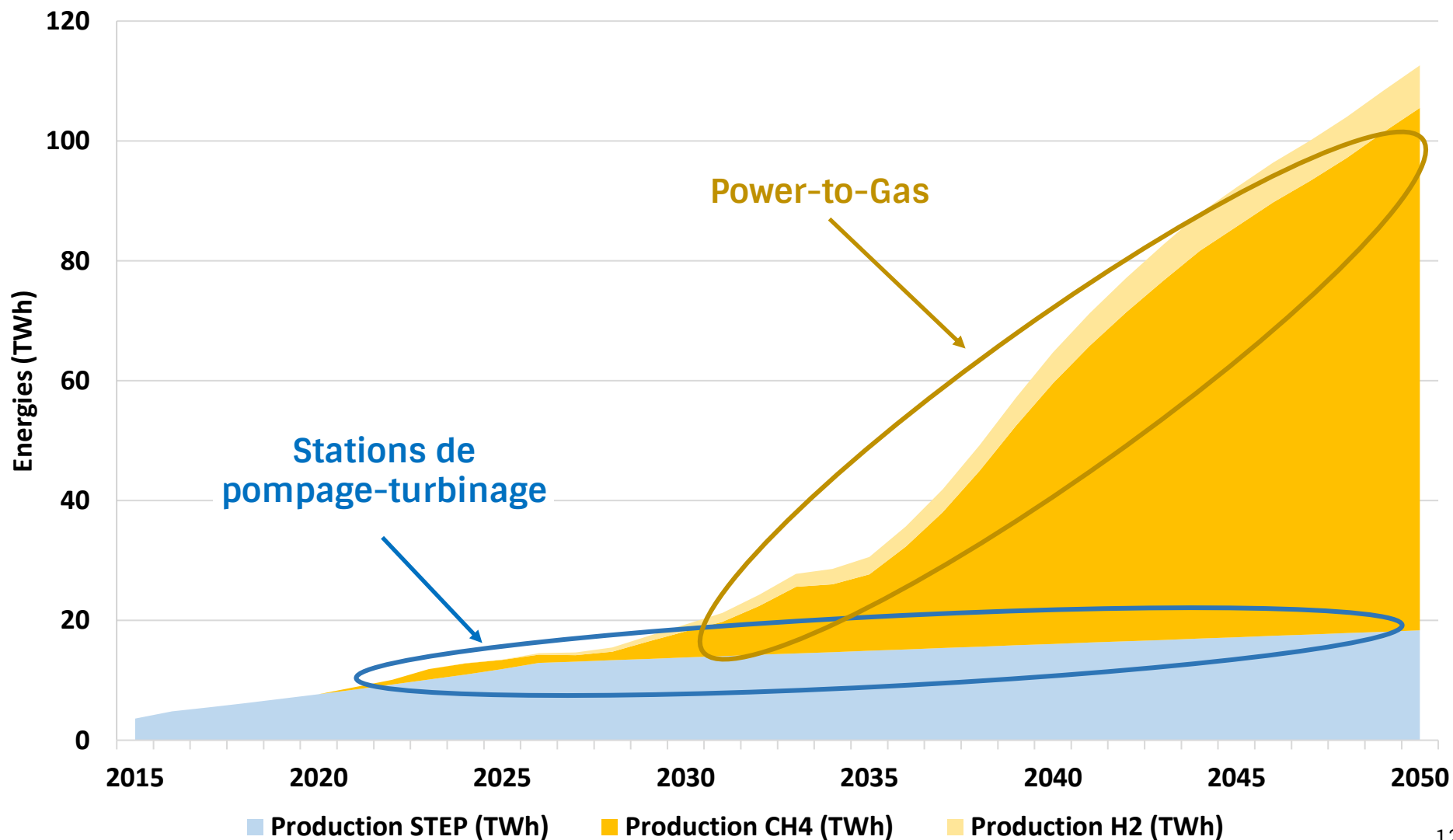
- Flexibilité i) dans le temps ii) dans l'espace iii) dans les usages



➤ STEP et Power-to-Gas dans le scénario nW



Stockage d'électricité





02.

Les contraintes électriques

- *La sécurité d'approvisionnement*
- **L'équilibrage court terme**
- *Le synchronisme du réseau*

“Kombikraftwerk 1” (2004-2007)



- Pilote du projet : Fraunhofer IWES (Kassel)
- Objectif : prouver la faisabilité d’un système électrique 100% renouvelable en Allemagne
- Approche :
 - maquette 1/10 000ème de l’Allemagne
 - moyens de production réels (PV + éolien + biogaz)
 - équilibrage via une centrale virtuelle (VPP)
 - Modélisation au pas horaire
- Résultats : équilibre atteint à tout moment **sans importation**
- Questions non abordées à l’époque :
 - Qualité de l’onde
 - Stabilité du réseau

Pour en savoir plus : <https://www.youtube.com/watch?v=8MHBz90z7IU>

Étude « Un mix électrique 100% renouvelable ? » - Octobre 2015

UN MIX ÉLECTRIQUE 100% RENEUVELABLE ?
ANALYSES ET OPTIMISATIONS

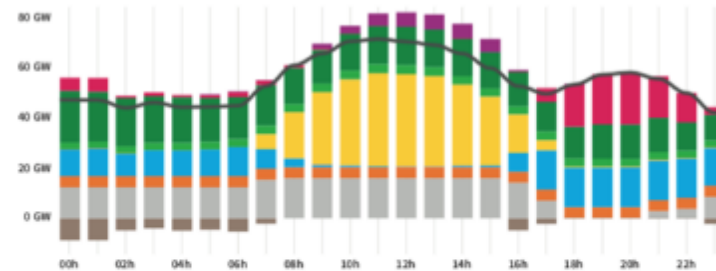
SYNTHÈSE TECHNIQUE ET SYNTHÈSE DE L'ÉVALUATION MACRO-ÉCONOMIQUE

Avec évaluation macro-économique

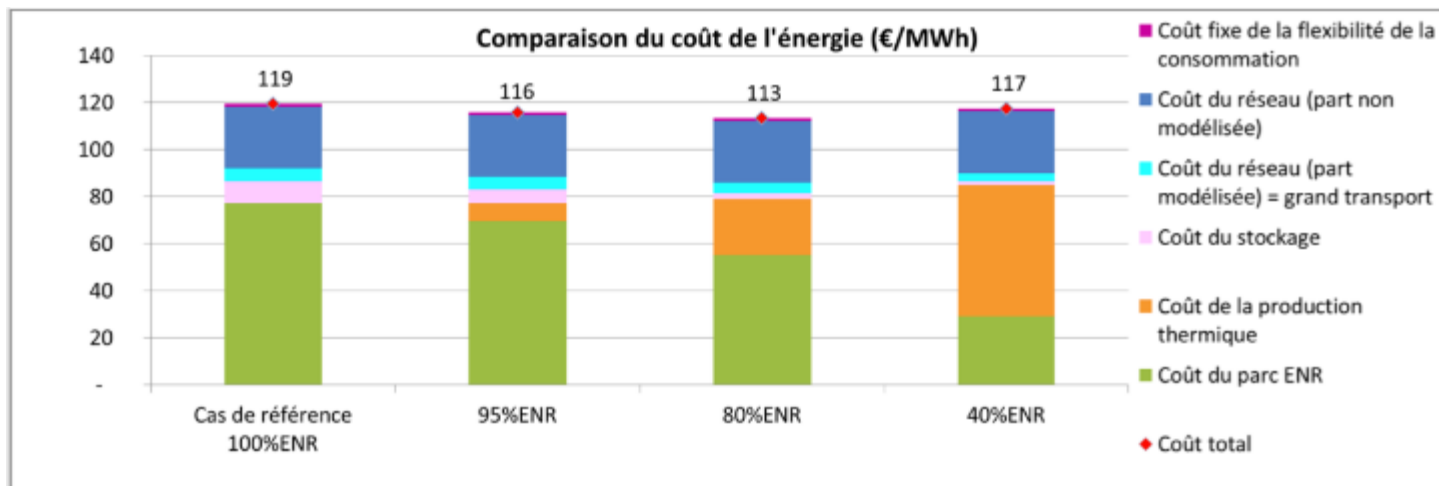
ADENE
Agence de l'Énergie
et du Climat de France

Un travail d'exploration des limites du développement des énergies renouvelables dans le mix électrique métropolitain et de ses potentielles retombées macro-économiques à un horizon 2050

Courbe de charge et mix électrique d'une journée type



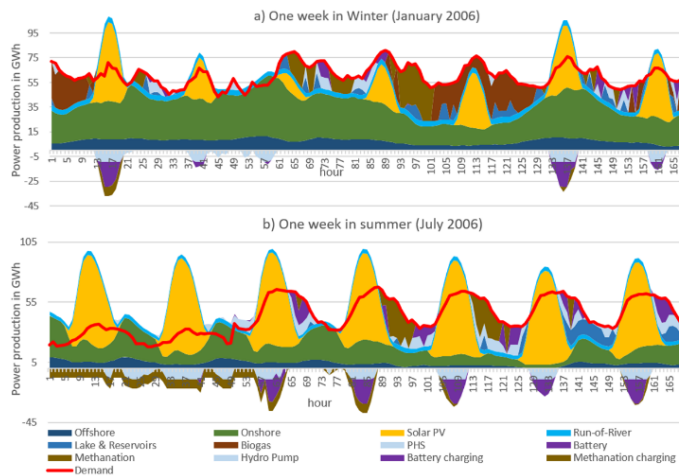
Données à 22h



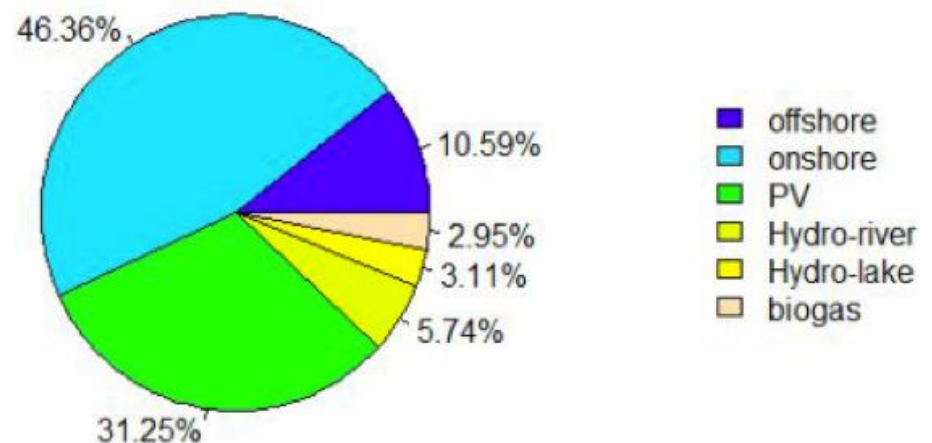
Répartition de la production et du coût

Optimisation sur 18 ans

Deux semaines typiques



Répartition de la production



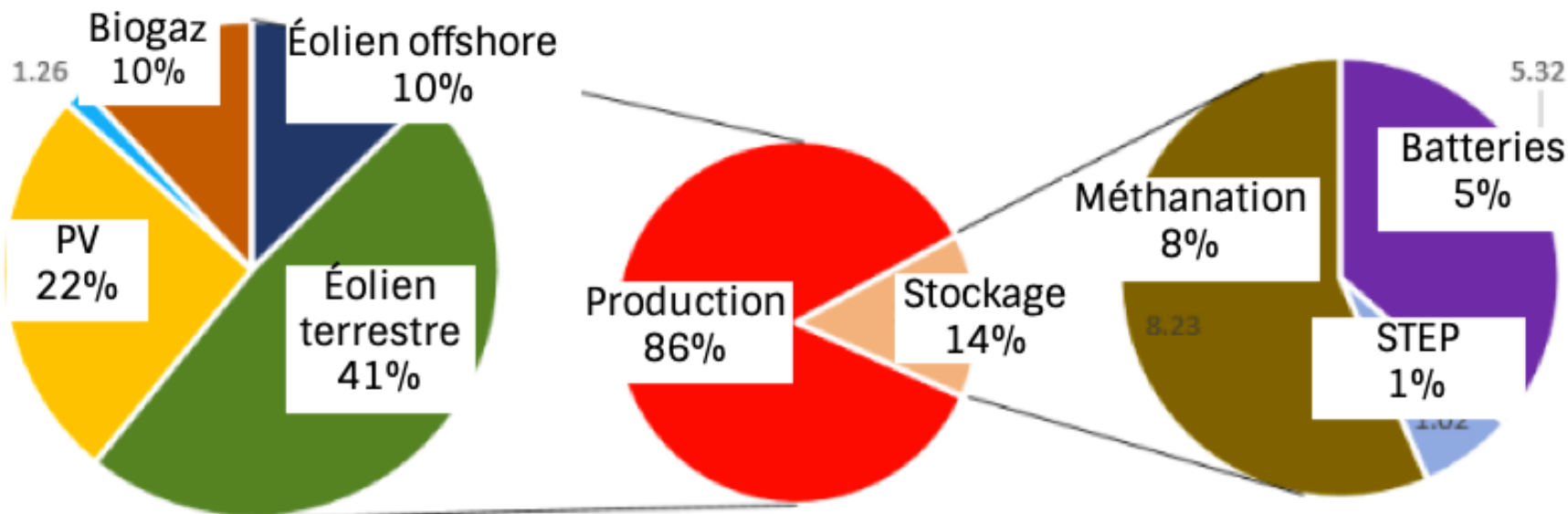
Source : CIRED - janvier 2021

↳ Équilibre au pas horaire : étude CIRED 2021



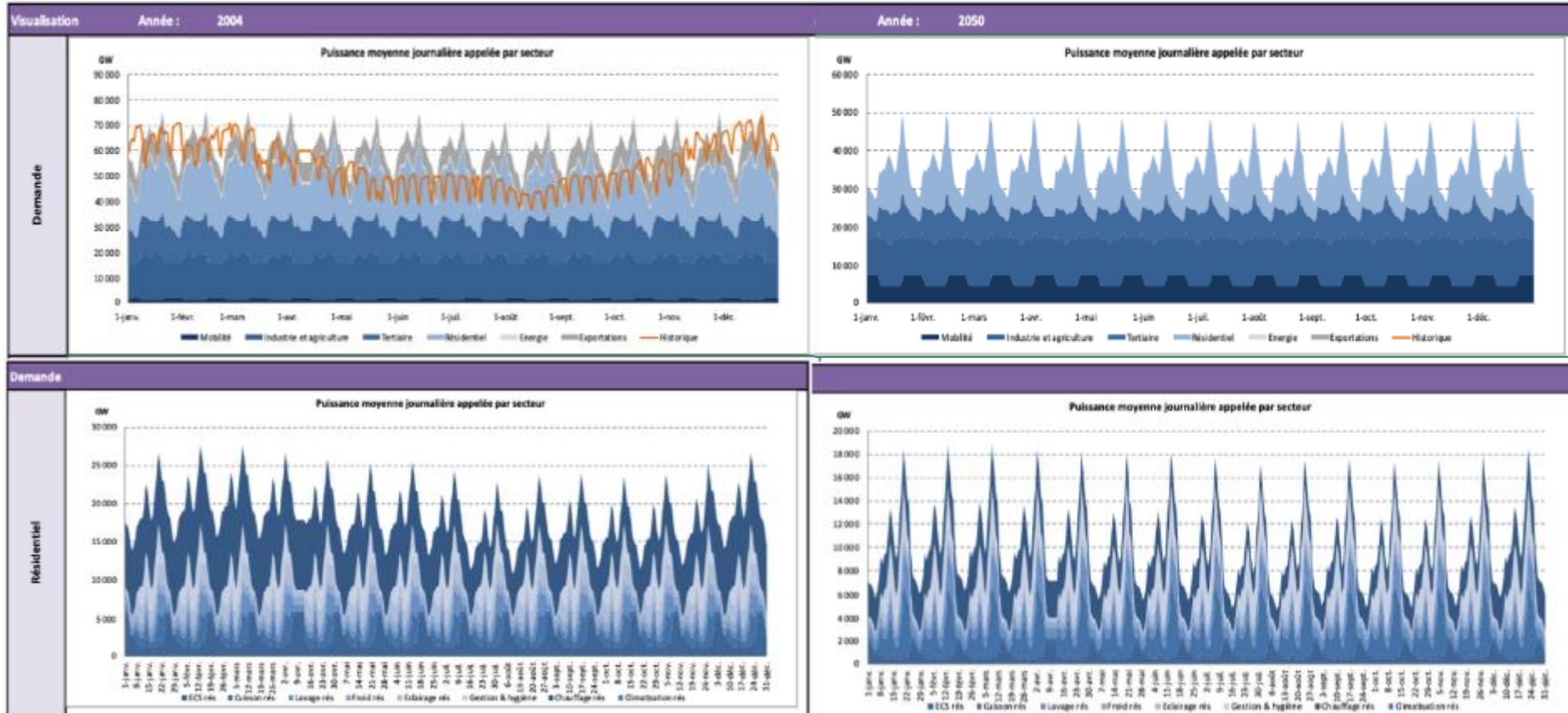
https://mcusercontent.com/907b5400397872c1a3f2e024c/files/97d0bb7d-5e66-4833-a1c8-f6594b37b385/201119ElecRenouvFrance2050_Diaporama.pdf

Coût total : 21,4 Mds €/an, 52 €/MWh



Source : CIRED - janvier 2021

➤ Équilibre au pas horaire : outil négaWatt





02.

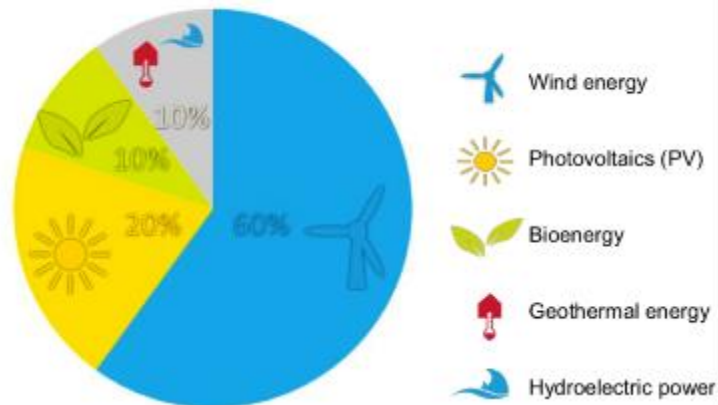
Les contraintes électriques

- *La sécurité d'approvisionnement*
- *L'équilibrage court terme*
- **La stabilité du réseau**

“Kombikraftwerk 2” (2011-2013)

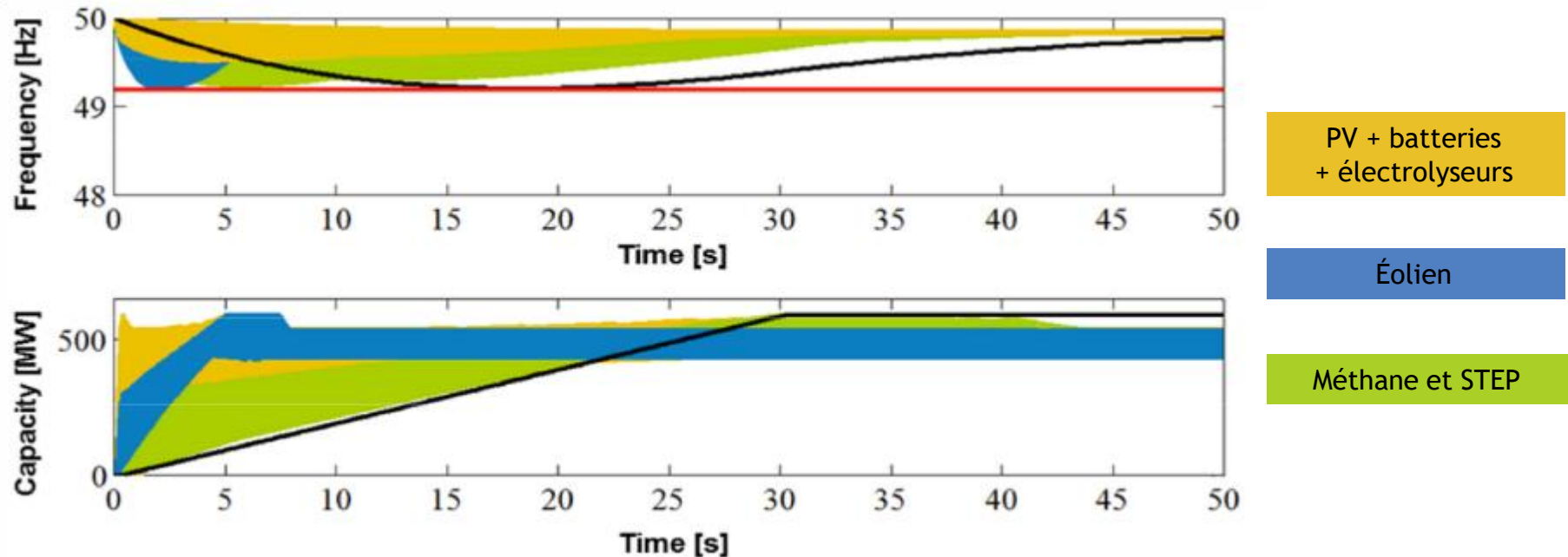


Energy mix used to meet the electricity consumption



- **Pilote du projet** : Fraunhofer IWES (Kassel) + 9 partenaires industriels
- **Objectif** : analyse de la **stabilité** du réseau électrique (fréquence et tension) avec 100 % d'énergies renouvelables
- **Approche** :
 - **Modélisation complète** du réseau haute tension allemand
 - Courbes de charges et de production **par poste-source**
 - Tests de réserves sur **53 sites réels**
 - Un mix électrique optimisé (*PV, éolien, biogaz, hydraulique et géothermie*)

“Kombikraftwerk 2”: stabilité de la fréquence

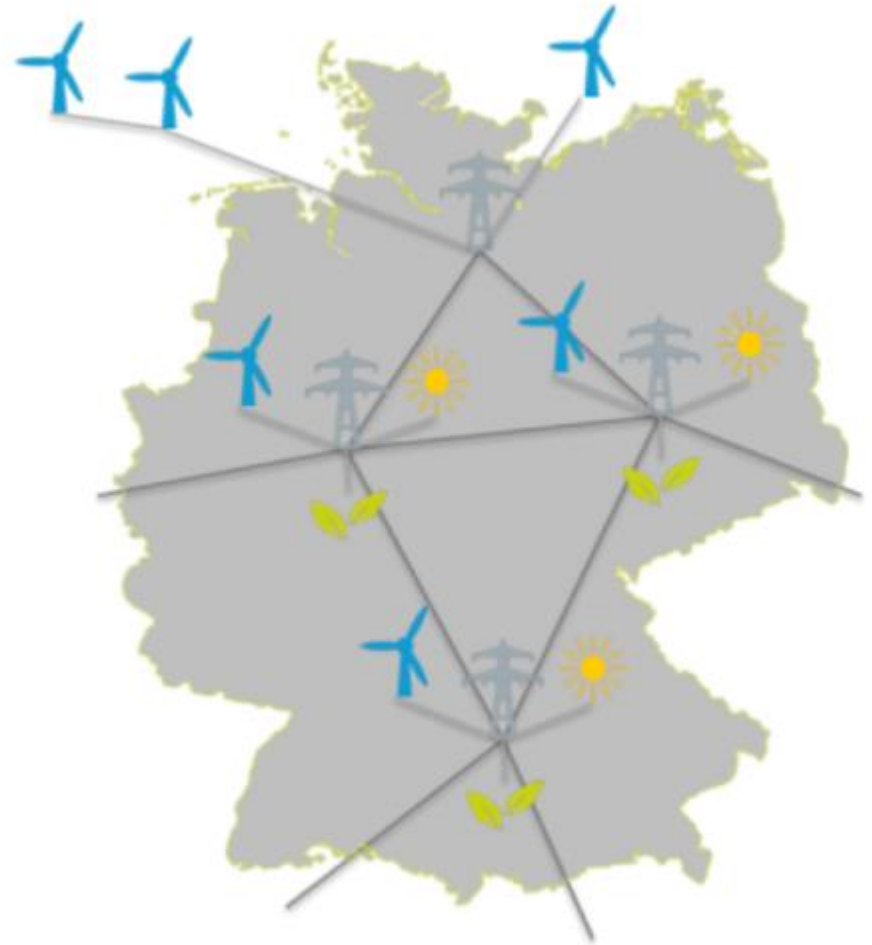


- Chute de fréquence après incident de production
- Remontée dynamique de la fréquence par contrôle de la puissance injectée
- Conformité aux exigences par un processus dynamique
- Fourniture de réserves avec optimisation économique et prévisions de répartition

“Kombikraftwerk 2” (2011-2013)

Conclusions :

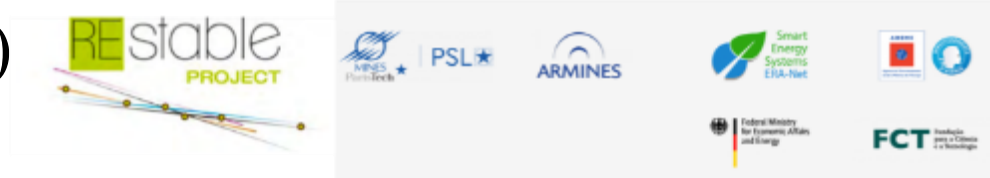
« Les simulations montrent qu'un **approvisionnement électrique avec 100% de sources renouvelables est techniquement possible** en Allemagne dans le futur dans de **bonnes conditions de fiabilité et de stabilité**, à condition que la production, le stockage et le secours **interagissent intelligemment avec le gaz renouvelable** »



↘ Stabilité : preuve de concept 2

Projet REStable (2015-2019)

<https://www.restable-project.eu/>



Fourniture de services-système par les sources renouvelables via une interaction améliorée entre zones européennes de contrôle de fréquence

- Tests **sur des parcs en fonctionnement** de fourniture de **services-système** conformes aux exigences du système électrique (*) par l'activation d'une **centrale électrique virtuelle** comprenant :
 - **12 parcs éoliens** en France et en Allemagne (puissance totale 220 MW)
 - **5 parcs photovoltaïques** en France (25 MW)
- **Prédiction des erreurs de prévision** basée sur une période préliminaire d'apprentissage de plus de 200 jours
- Évaluation des tests à travers **9 indicateurs** principaux

(*) *contrôle de fréquence (FCR), restauration de fréquence automatique (aFRR) et manuelle (mFRR), réserve de remplacement (RR)*

Projet REStable : résultats

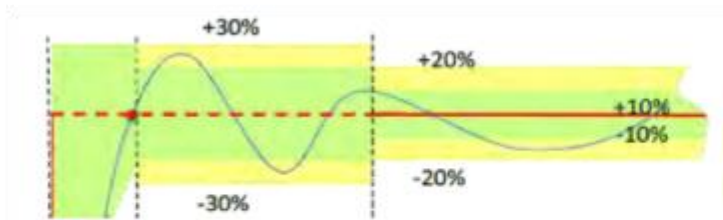


Figure 68 Determination of Permitted and Tolerated Area

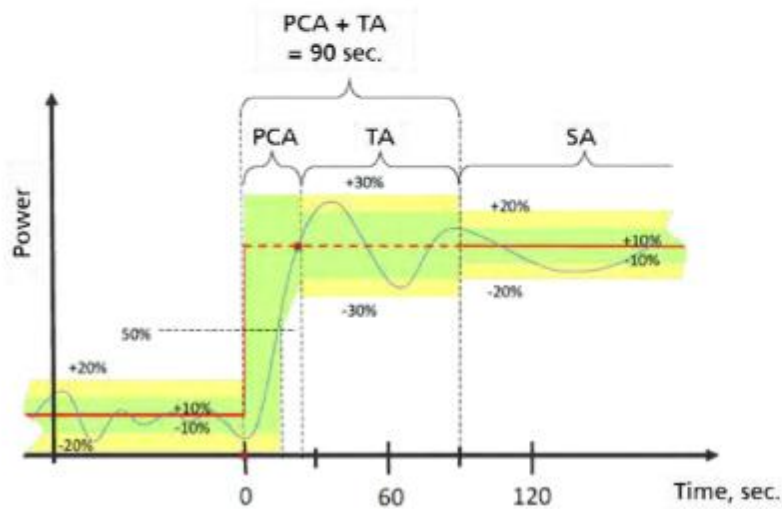


Figure 69 Schematic illustration of "permitted" and "tolerated" intervals (FCR)

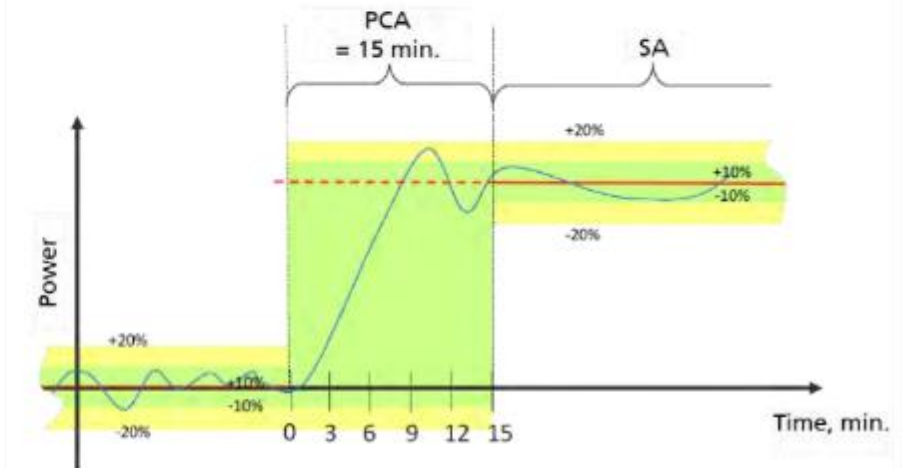
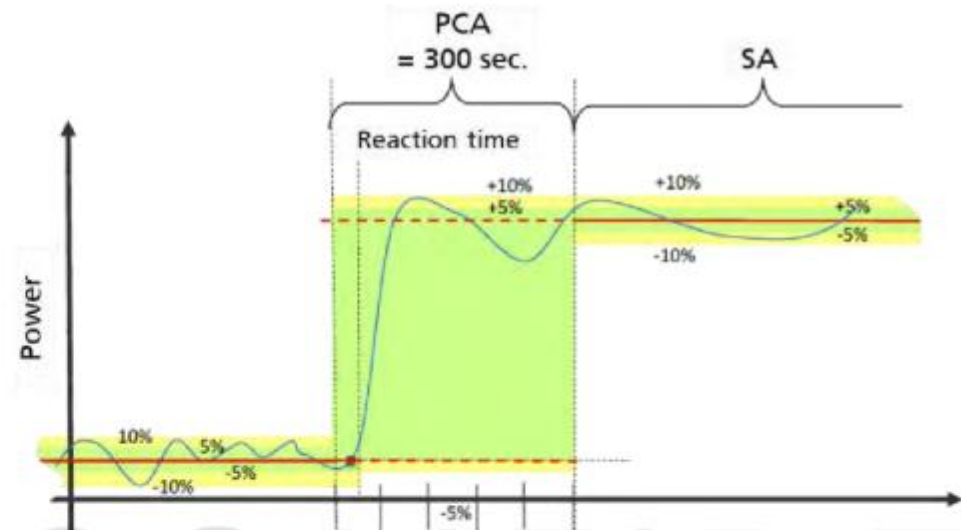


Figure 71 Schematic illustration of "permitted" and "tolerated" intervals (mFRR)

↘ Stabilité : preuve de concept 3



Le programme “MIGRATE” (2016-2019)

Massive **I**nte**G**RAtion of power **E**lectronics devices

<https://www.h2020-migrate.eu/>



https://www.youtube.com/watch?v=i_QhVNMZlji&feature=emb_logo

Synthèse : les différentes solutions envisageables



- ① Conserver une part de production classique dans le mix de production
- ② Améliorer le contrôle des onduleurs *grid-following*, avec des contrôles du type inertie virtuelle
- ③ Installer des compensateurs synchrones
- ④ Avoir une partie des convertisseurs qui soient *grid-forming*.

Solutions qui permettent d'atteindre 100% de production ENR à base de convertisseurs

➔ « La » solution résidera probablement dans un mix de ces solutions

La comparaison des coûts en matériel et pertes montre à ce stade que les ordres de grandeurs sont similaires entre l'utilisation de *grid forming* ou de compensateurs synchrones (analyses à prolonger)

« Conditions et prérequis en matière de faisabilité technique pour un système électrique avec une forte proportion d'énergies renouvelables à l'horizon 2050 »

- Commandé par le MTES en 2019, publié le 27 janvier 2021
- Étape intermédiaire du *Bilan prévisionnel de long-terme* en cours d'élaboration par RTE
- Principaux résultats :
 - 1) « *Il existe un **consensus scientifique** sur l'existence de solutions technologiques permettant de maintenir la stabilité du système électrique sans production conventionnelle.* »
 - 2) « *La sécurité d'alimentation [...] peut être garantie, même dans un système reposant en majorité sur des énergies à profil de production variable comme l'éolien et le photovoltaïque* » (cela passe par la flexibilité, le pilotage de la demande, le stockage, des centrales de pointe et le développement des interconnexions)
 - 3) « *Le dimensionnement des réserves opérationnelles et le cadre réglementaire [...] devront être sensiblement révisés, et les méthodes de prévision de la production renouvelable variable continuellement améliorées.* »
 - 4) Des efforts substantiels devront être consacrés au développement des réseaux d'électricité **à compter de 2030**, tant au niveau du transport que de la distribution.

➤ En conclusion, on peut dire que ...



- Un **système électrique 100% renouvelable** est **techniquement faisable** (consensus scientifique)
- Il demande :
 - l'industrialisation progressive de solutions aujourd'hui disponibles (*power-to-gas, grid-forming, compensateurs synchrones, prévisions de production, flexibilité, ...*)
 - une adaptation du cadre réglementaire et du volume des réserves
 - une collaboration et une bonne coordination entre toutes les parties prenantes
- Par ailleurs, les investissements sur le réseau qu'il nécessite sont à mettre au regard de :
 - la nécessité **dans tous les cas** d'investir massivement à court-moyen terme dans les moyens de production d'électricité (*nucléaire existant, nouveau nucléaire ou renouvelables*)
 - la poursuite attendue de la baisse spectaculaire des coûts de production du PV et de l'éolien en comparaison des autres moyens de production « décarbonés »
 - la baisse des coûts des technologies émergentes contribuant à l'équilibre et à la stabilité du réseau (*pilotage de la demande et de la production, batteries, Power-to-gas, ...*)
- Ainsi, refuser de s'engager dans cette voie ne relève pas d'un choix techniquement et économiquement rationnel, mais d'un **choix idéologique ou politique**

Décrypter l'énergie :
www.decrypterlenergie.org



Décrypter l'énergie

Votre recherche

Twitter Facebook France

Un système électrique alimenté à 100 % par les énergies renouvelables est-il techniquement possible en France ?

Tous les consommateurs d'électricité, qu'il s'agisse de ménages, d'entreprises ou de services publics comme les hôpitaux, doivent pouvoir être alimentés à tout moment, en fonction de leurs besoins. Un système électrique 100 % renouvelable, où le photovoltaïque et l'éolien seraient dominants, pourrait-il fonctionner alors que le soleil et le vent fluctuent ?

Publié le 23 mars 2021
Modifié le 2 avril 2021

En quelques mots

Dès 2011, l'Association négaWatt a montré¹ la faisabilité d'un système électrique² 100 % renouvelable en France. En 2017, elle a réitéré l'exercice en s'appuyant à la fois sur nombre de travaux théoriques et pratiques menés à l'étranger, notamment les études *Kombikraftwerk* 1 et 2 menées en Allemagne à la demande d'Angela Merkel³, et sur ses propres outils de modélisation au pas horaire. **Depuis, l'hypothèse de la possibilité d'un système électrique majoritairement alimenté par des énergies renouvelables non-pilotables, comme l'éolien et le photovoltaïque, gagne chaque jour du terrain. Elle est confirmée par un grand nombre d'études et de projets portant sur divers aspects de cette problématique réalisés en France, en Europe et dans le monde.**

Comme le confirment à la fois l'étude publiée fin 2020 par trois chercheurs du CIRED⁴ et l'étude conjointe de RTE et de l'AIE publiée en janvier 2021⁵, cette hypothèse peut, sous certaines conditions, devenir en quelques décennies une réalité techniquement et économiquement viable. Comment ? Grâce à l'amélioration constante de la connaissance scientifique et aux

Partagez

Twitter Facebook LinkedIn Email PDF

Enjeux

Demande d'énergie

- Bâtiment
- Transports
- Industrie

Production d'énergie

- Renouvelables
- Fossiles
- Nucléaire
- Réseaux
- Impacts