



UN MIX ÉLECTRIQUE 100% RENOUVELABLE ?



ANALYSES ET OPTIMISATION

↓

CE SITE PRÉSENTE UN RÉSUMÉ EN 6 POINTS DES ENSEIGNEMENTS DE CETTE ÉTUDE MENÉE PAR L'ADEME :



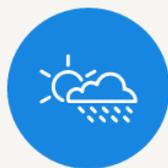
1

La combinaison des technologies est essentielle



2

Le système électrique intelligent et flexible est indispensable



3

Le mix électrique est robuste aux aléas météorologiques



4

Le développement du réseau permet de mutualiser les potentiels



5

L'impact économique peut être anticipé



6

L'équilibre du système est atteint à tout moment

L'étude prospective à vocation scientifique et exploratoire qui vous est présentée a pour objectif de **mieux comprendre les clés de fonctionnement d'un système électrique 100% renouvelable en France métropolitaine**. Sur le réseau électrique, la production d'électricité et la consommation doivent s'égaliser à chaque instant. Or les énergies renouvelables comme le photovoltaïque ou l'éolien produisent au gré de la météo. **Alimenter le mix électrique français avec 100% d'EnR est-il possible ?**

Les analyses s'appuient sur un modèle permettant de déterminer les parcs renouvelables optimaux région par région, et de vérifier heure par heure que l'équilibre entre la production et la demande peut être réalisé. L'horizon d'un tel mix électrique serait probablement très éloigné (post-2050) et l'étude ne s'intéresse pas à la trajectoire temporelle d'évolution du système électrique actuel. Plusieurs scénarios prospectifs ont donc été construits et optimisés, de manière à balayer un champ des possibles.

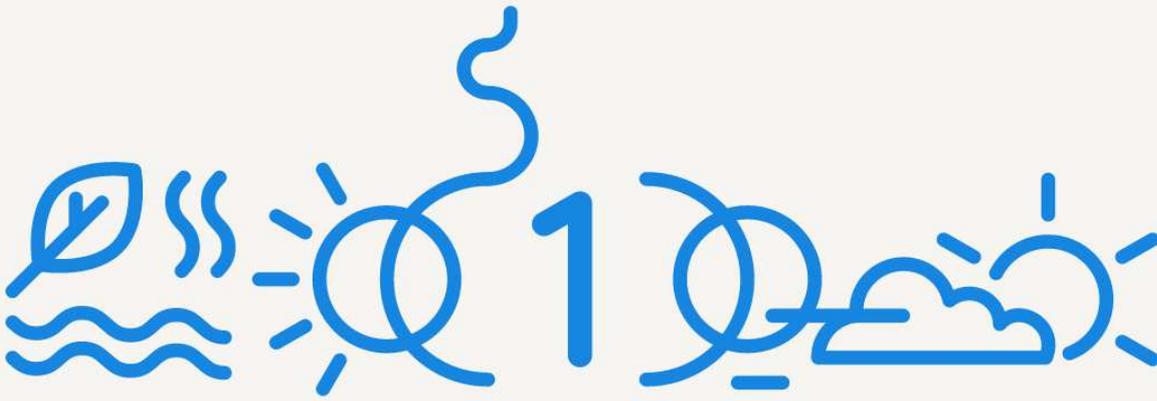
Que retenir de cette étude ?

➤ Que plusieurs mix électriques semblent techniquement possibles pour atteindre 80 ou 100% de renouvelables, en satisfaisant la demande chaque heure de l'année.

➤ Qu'un tel mix 100% renouvelable nécessiterait des adaptations très importantes du système électrique, mais que son coût global serait vraisemblablement du même ordre de grandeur qu'un mix 40% renouvelable.

Décryptage.





LA COMBINAISON DES TECHNOLOGIES EST ESSENTIELLE

L'étude identifie plusieurs mix électriques 100% renouvelables possibles. Ils sollicitent tous différentes énergies renouvelables, dont les productions sont complémentaires. La répartition géographique des moyens de production est optimisée : plus de solaire dans le sud,

où l'ensoleillement est plus important ; plus d'éolien là où le vent souffle plus fort. On tire ainsi parti des potentiels les plus intéressants (et donc les moins chers économiquement).



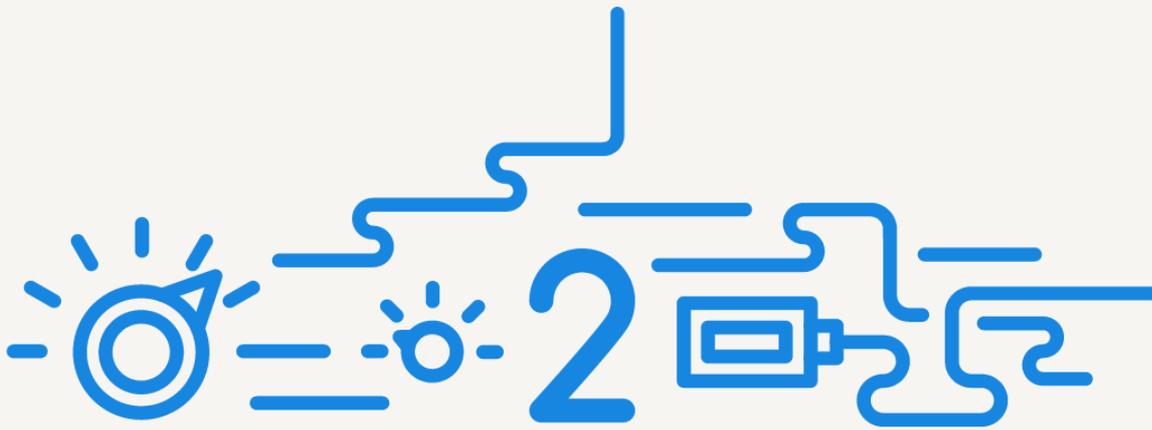
Pour déterminer un mix électrique pour 2050, il est nécessaire de s'appuyer sur quelques hypothèses pour lesquelles il existe une marge d'incertitude. En fonction de ces hypothèses prospectives, l'optimisation aboutit à plusieurs mix différents. 3 scénarios vous sont présentés ci-dessous en plus du scénario central : Si le coût de développement du réseau devient plus contraignant, le mix électrique se recentre autour des lieux de consommation.

Si l'acceptabilité sociale des renouvelables est plus modérée, l'éolien terrestre est moins installé, au profit des énergies moins visibles, comme les énergies marines, l'éolien en mer et le solaire sur toiture.

Si les technologies émergentes (énergies marines notamment) voient un fort progrès technologique et un gain important sur leurs coûts, ces dernières peuvent prendre une place plus importante dans un mix électrique 100% renouvelable.

Si le coût de développement du réseau devient plus contraignant, le mix électrique se recentre autour des lieux de consommation.





UN SYSTÈME ÉLECTRIQUE INTELLIGENT ET FLEXIBLE

Dans le mix 100% EnR, la grande majorité de la production étant assurée par des moyens variables et non pilotables, il est nécessaire de mettre en place davantage d'intelligence pour piloter une flexibilité à différents horizons temporels :

- **Le pilotage de la demande apporte une flexibilité journalière.** Il consiste à piloter certains usages comme l'eau chaude sanitaire ou la charge des véhicules électriques en adéquation avec les besoins de gestion du système électrique.

- **Le stockage** comprend des moyens hydrauliques (station de transfert

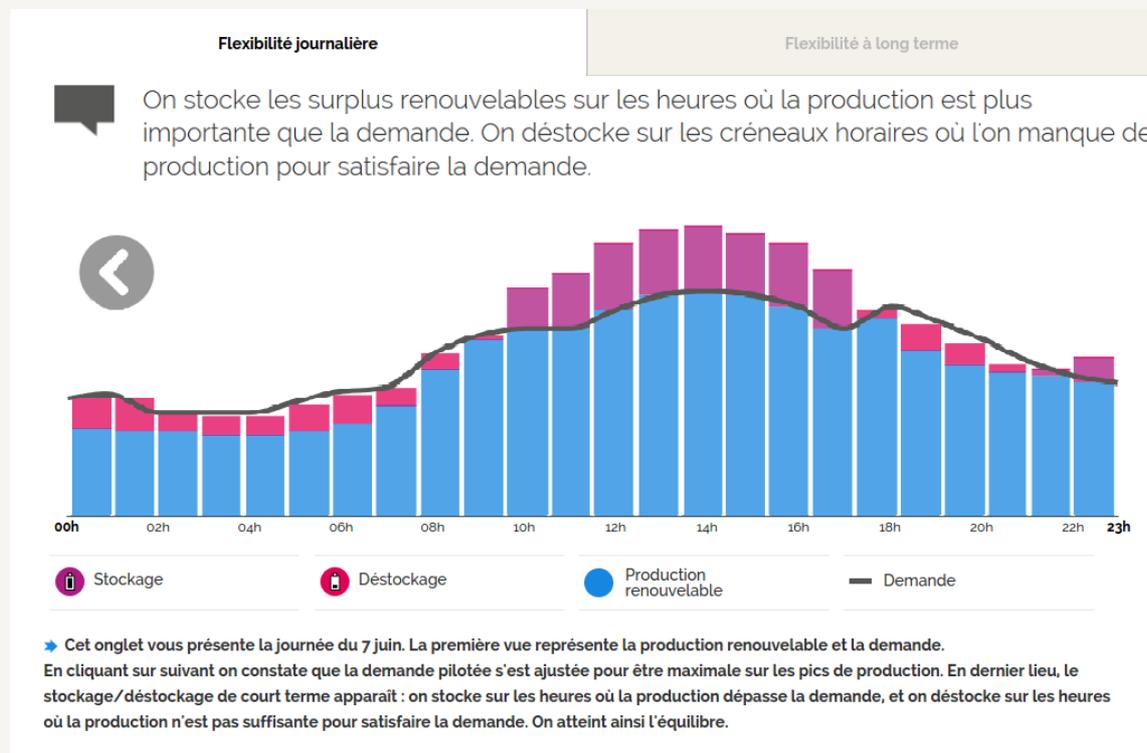
d'énergie par pompage), des batteries et des stockages à air comprimé (compressed air energy storage). Il permet des transferts d'énergie sur la journée ou la semaine.

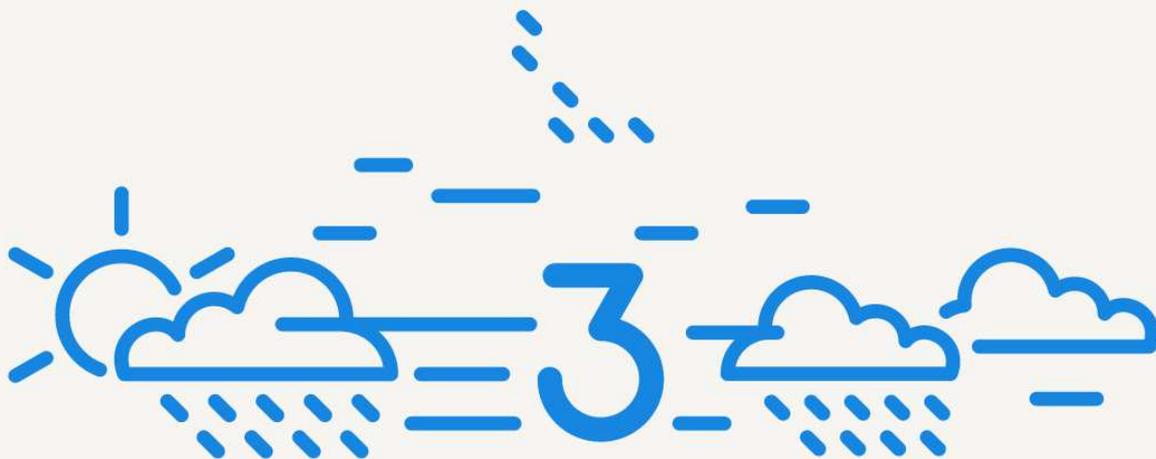
- **Le power to gas to power (stockage de la surproduction grâce à sa transformation en gaz)** apporte une flexibilité sur une échelle de temps plus longue : globalement le gaz de synthèse est produit au printemps et à l'été, pour une utili-

sation en hiver, via des turbines à combustion. Il permet une flexibilité inter-saisonnière.

➔ L'animation ci-dessous vous présente ces leviers dans l'espace d'une journée moyenne en France en 2050, ainsi qu'à plus long terme. Le pilotage de la demande permet ainsi de reporter certaines consommations à des instants où la production sera plus disposée à y répondre. Le stockage créé par la surproduction venant compléter la production lorsque la demande en électricité n'est pas couverte totalement par la production.

Le pilotage de la demande apporte une flexibilité journalière

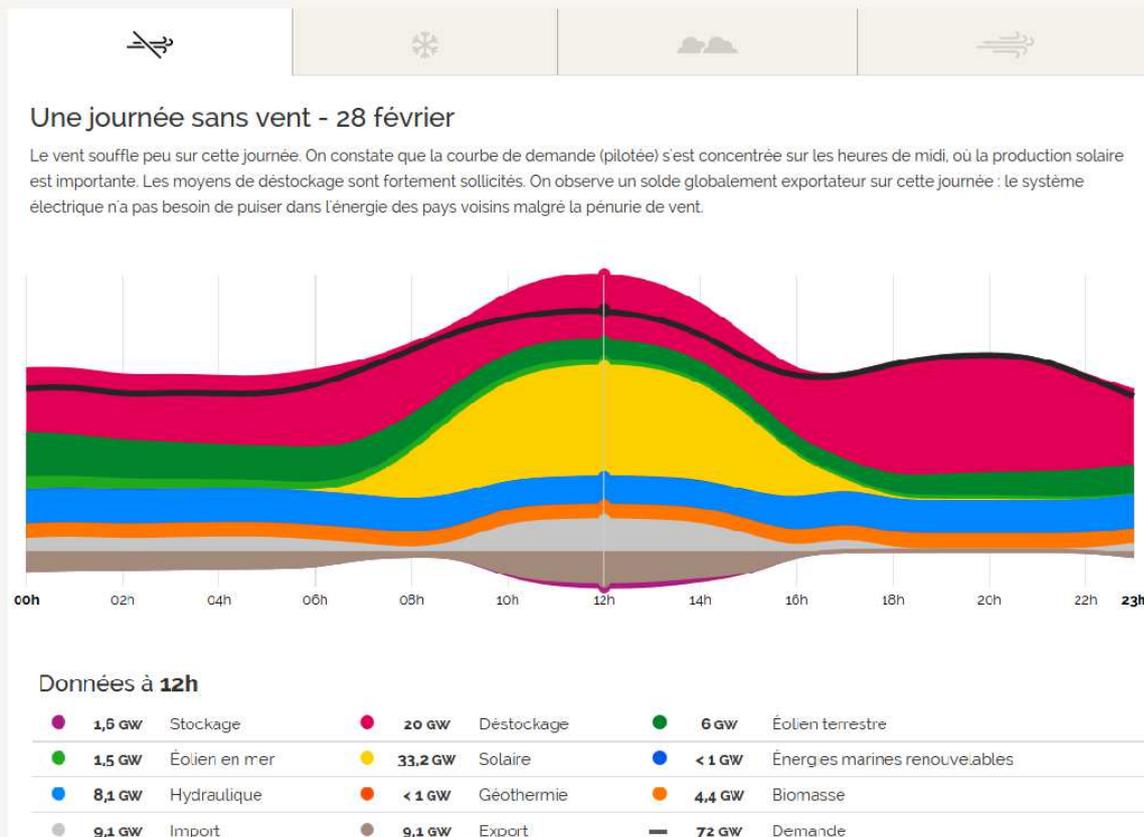


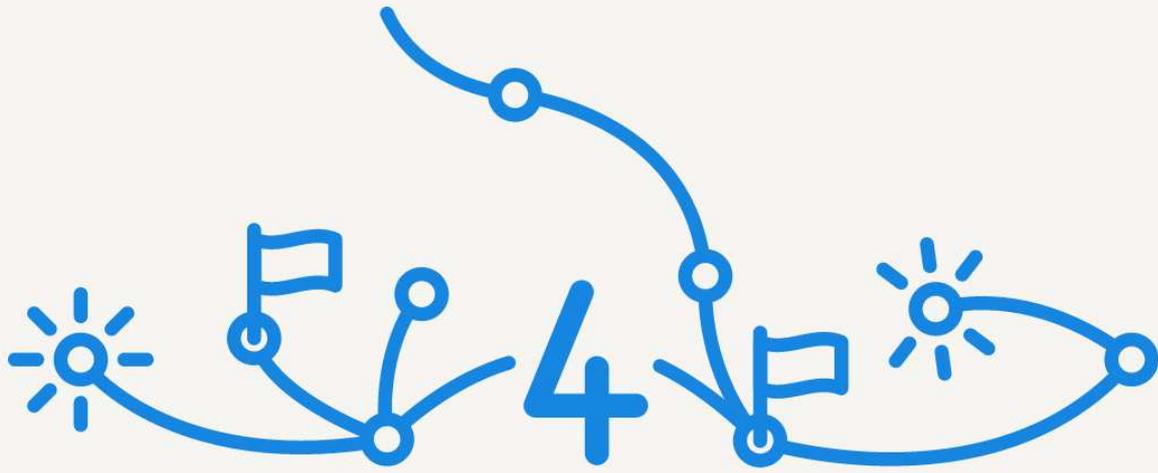


UN MIX ÉLECTRIQUE ROBUSTE AUX ALÉAS MÉTÉOROLOGIQUES

Principalement composé de ressources éolienne et photovoltaïque, le mix électrique a été testé sur 7 années d'ensoleillement et de vent. Il permet par exemple de passer un hiver froid (pointe de puissance de type hiver 2012) ou encore une semaine où le vent tombe. Quatre journées ont été sélectionnées pour illustrer cette robustesse:

Le mix a été testé sur 7 années de température, d'ensoleillement et de vent





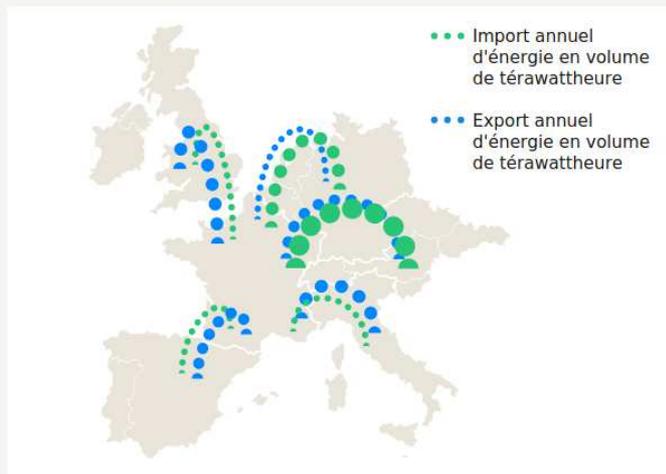
LE DÉVELOPPEMENT DU RÉSEAU EST NÉCESSAIRE ET PERMET DE MUTUALISER LES POTENTIELS

Le réseau joue un rôle de mutualisation des potentiels. Dans un mix renouvelable, son importance croît : par rapport à aujourd'hui le besoin en lignes inter-régionales augmente de 36%. Même si les moyens de productions du mix 100% EnR sont très décentralisés, le réseau permet d'acheminer l'électricité parfois produite en surplus localement au gré de la météo pour compenser des déficits de production ailleurs sur le territoire : c'est le « foisonnement »

Le modèle proposé ne repose pas sur l'autarcie électrique de la France, qui est déjà largement interconnectée avec ses pays voisins en 2014. Les interconnexions avec les pays voisins sont donc prises en compte, en veillant à ce que les échanges soient équilibrés. Dans la modélisation,

ces derniers ont des mix électriques à 80% renouvelables. Toutes les importations d'électricité sont compensées par des exports d'électricité renouvelable produite en France.

Toutes les importations d'électricité sont compensées par des exports d'électricité renouvelable produite en France



Europe du Nord → France	17,83 TWh
Ibérie → France	8,41 TWh
Europe centrale → France	11,95 TWh
Europe du Sud → France	7,98 TWh
Royaume-Uni & Irlande → France	9,95 TWh

France → Europe du Nord	6,39 TWh
France → Ibérie	15,62 TWh
France → Europe centrale	4,97 TWh
France → Europe du Sud	13,43 TWh
France → Royaume-Uni & Irlande	15,71 TWh



UNE ÉVALUATION DE L'IMPACT ÉCONOMIQUE

Sur la base des hypothèses retenues, le mix 100% EnR est ainsi estimé à seulement 2% de surcoût par rapport à un mix 40% renouvelable. Les paramètres qui influent le plus sur son coût sont :

- l'acceptabilité sociale des énergies renouvelables,
- les progrès technologiques,
- la maîtrise de la demande d'énergie.

Des valeurs défavorables pour ces différents paramètres génèrent des surcoûts de l'électricité compris entre 5% et 14%. A contrario, l'accès à un financement à faible taux d'intérêt permet une baisse de 14% de ce coût.

Ce coût prend en compte l'ensemble des coûts de production de l'électricité, de réseau et de stockage et se décompose de la manière suivante:

- moyens de production renouvelables (65% du coût),
- développement du réseau (27% du coût),
- stockage et flexibilité de la demande (8% du coût).

5%

C'est le surcoût de l'électricité en cas de faible maîtrise de la demande.

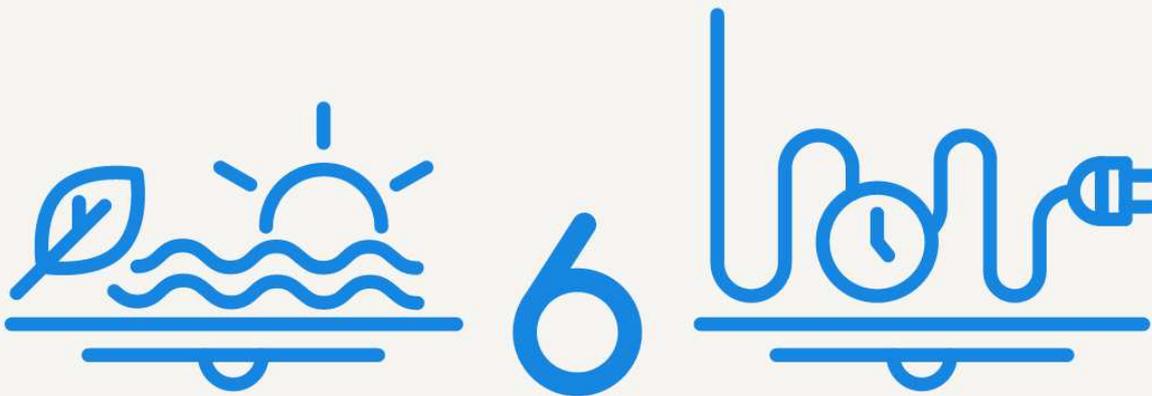
2%

C'est le surcoût du scénario 100% renouvelable par rapport à un scénario 40% renouvelable



Décomposition des coûts

- 65% Moyens de production renouvelable
- 27% Coût du réseau
- 8% Stockage et flexibilité de la demande



L'ÉQUILIBRE DE LA PRODUCTION ET DE LA DEMANDE EST ATTEINT TOUTE L'ANNÉE, SUR UNE BASE HORAIRE

L'année horaire est simulée de début juin à fin mai pour des raisons techniques liées à l'optimisation. Ce découpage permet de simuler un hiver complet et d'implémenter une gestion réaliste et cohérente de l'hydraulique (lacs et barrages principalement).

➔ Utilisez l'animation ci-dessous pour explorer plus en détails le mix électrique envisagé pour une journée précise ou suivant une période donnée en utilisant le bouton lecture/pause et en déplaçant l'étiquette indiquant le jour où se place le curseur de lecture. L'animation présente les flux d'échange d'électricité entre les régions françaises, et la répartition des différentes énergies, heure par heure.

RETROUVEZ L'ÉTUDE COMPLÈTE SUR LE SITE INTERNET DE L'ADEME

