



## INTÉGRATION DES ÉNERGIES RENOUVELABLES VARIABLES DANS LES SYSTÈMES ÉLECTRIQUES : COMMENT S'Y PRENDRE

Compte tenu de l'importance croissante des énergies renouvelables et en particulier des énergies renouvelables variables partout dans le monde, les décideurs politiques et industriels doivent répondre à des problèmes nouveaux pour assurer la croissance continue des énergies renouvelables variables et réussir leur intégration dans les systèmes électriques.

S'appuyant sur des études de cas dans 32 pays sur les cinq continents, le rapport « Intégration des énergies renouvelables variables dans les systèmes électriques : comment s'y prendre » met en évidence les enseignements tirés, identifie les facteurs critiques de réussite et propose des solutions pratiques pour réussir cette intégration. Le rapport a été produit en collaboration avec le CESI, en Italie, et avec les contributions des 48 membres du réseau « énergies renouvelables » du Conseil Mondial de l'Énergie.

### PRINCIPAUX RÉSULTATS

**1** **LES ÉNERGIES RENOUVELABLES, HYDROÉLECTRICITÉ INCLUE, REPRÉSENTENT AUJOURD'HUI ET DANS LE MONDE ENVIRON 30 % DE LA CAPACITÉ INSTALLÉE DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ ET 23 % DE LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ.** Au cours des 10 dernières années, l'éolien et le solaire photovoltaïque ont connu une croissance annuelle moyenne de leur puissance installée explosive de 23 % et 51 % respectivement, bien que leur contribution totale à la production mondiale d'électricité soit d'environ 4 %.

**2** **LES ÉNERGIES RENOUVELABLES SONT DEVENUES UN GRAND BUSINESS : EN 2015, 286 MILLIARDS DE DOLLARS ONT ÉTÉ INVESTIS DANS 154 GW DE NOUVELLES CAPACITÉS RENOUVELABLES (76 % DANS L'ÉOLIEN ET LE PHOTOVOLTAÏQUE),** dépassant de loin l'investissement dans la production conventionnelle qui a augmenté de 97 GW. On a observé un glissement du marché des pays développés vers les économies émergentes. La Chine représentait à elle seule 36 % des investissements mondiaux dans les énergies renouvelables.

**3** **L'AMÉLIORATION DES TECHNOLOGIES ET LA RÉDUCTION DES COÛTS ENTRAÎNENT UNE BAISSÉ DES DÉPENSES DE CAPITAL (CAPEX) ET DES COÛTS D'EXPLOITATION ET DE MAINTENANCE** des énergies renouvelables variables, en particulier du photovoltaïque. Les données disponibles les plus récentes suggèrent que la valeur d'enchère la plus basse pour l'éolien est de 28 dollars US / MWh au Maroc et de 30 dollars US / MWh pour une centrale photovoltaïque de 800 MW à Dubaï. Ces valeurs exceptionnellement faibles ne peuvent pas être généralisées à d'autres pays dont les facteurs de charge pour le vent et le soleil sont différents (en Europe continentale, par exemple, ils sont jusqu'à 50 % inférieurs) et les coûts locaux élevés.

**4** EN 2015, 164 PAYS ONT MIS EN PLACE DES POLITIQUES DE SOUTIEN AUX ÉNERGIES RENOUVELABLES ; 95 d'entre eux sont des pays en développement contre 15 en 2005.

**5** L'EXEMPLE DE L'UNION EUROPÉENNE (UE) SOULIGNE LES CONSÉQUENCES DES RÉDUCTIONS DE SUBVENTIONS et des autres mécanismes de soutien à l'investissement dans les énergies renouvelables : en raison de la diminution des subventions, la part de l'UE dans la puissance installée mondiale de solaire photovoltaïque au cours des quatre dernières années a chuté de 75 % à 41 % ; la part de l'éolien de 41 % à 33 %.

## LES ÉNERGIES RENOUVELABLES DANS LE SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE MONDIAL

Filière	Puissance installée 2004		Puissance installée 2014		TCAM <sup>1</sup> (%)	Production 2014		Durée moyenne d'exploitation annuelle Heures
	GW	Part (%)	GW	Part (%)		TWh	Part (%)	
 Hydroélectricité	715	18,8	1 055	17,1	4	3 898	16,6	3 694
 Éolien	48	1,3	370	6,0	23	728	3,1	1 967
 Biomasse	39	1,0	93	1,5	9	423	1,8	4 545
 Solaire	3	0,1	181	2,9	51	211	0,9	1 168
 Géothermie	9	0,2	13	0,2	4	94	0,4	7 225
Total renouvelables	814	21,4	1 712	27,7	8	5 353	22,8	3 127
Total conventionnel <sup>2</sup> et nucléaire	2 986	78,6	4 468	72,3	4	18 127	77,2	4 057
<b>TOTAL</b>	<b>3 800</b>	<b>100</b>	<b>6 180</b>	<b>100</b>	<b>5</b>	<b>23 480</b>	<b>100</b>	<b>3 799</b>

Source : CESI S.p.A., basé sur REN21 2015

**6** UNE BONNE LOCALISATION AVEC DES FACTEURS DE CHARGE ÉLEVÉS POUR LE VENT OU LE SOLEIL ET DES COÛTS DE CONNEXION AU RÉSEAU FAIBLES sont la clé du succès pour de nouveaux et grands projets de renouvelables variables.

**7** GÉRER RAPIDEMENT LES IMPLICATIONS DE LA NATURE VARIABLE DU VENT ET DU SOLEIL EST UN VRAI DÉFI POUR L'INTÉGRATION DES ÉNERGIES RENOUVELABLES VARIABLES.

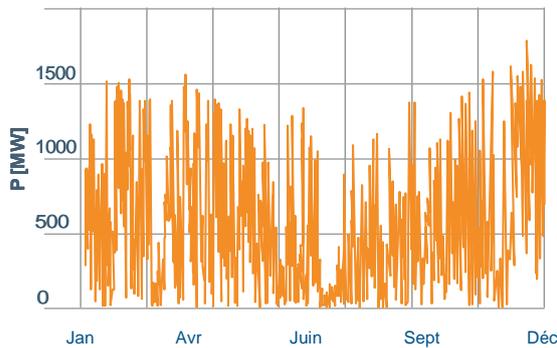
<sup>1</sup> TCAM = taux de croissance annuel moyen

<sup>2</sup> Conventionnel = pétrole, gaz et charbon

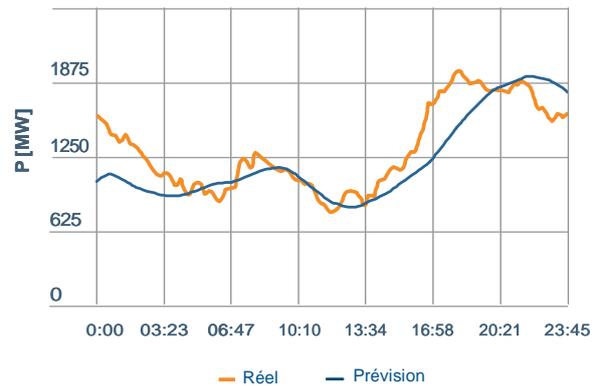
Les graphiques ci-dessous illustrent les effets de la variabilité du vent sur la production d'électricité d'un parc éolien en Irlande et des variations du soleil sur une petite installation photovoltaïque en Italie centrale.

## VARIABILITÉ ANNUELLE ET JOURNALIÈRE DE LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ D'UN PARC ÉOLIEN EN IRLANDE

ANNÉE

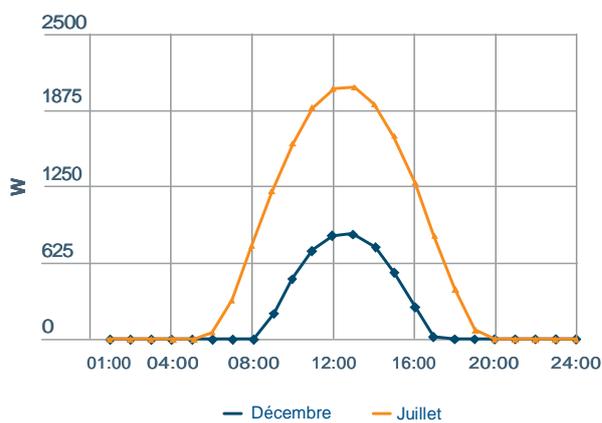


JOUR

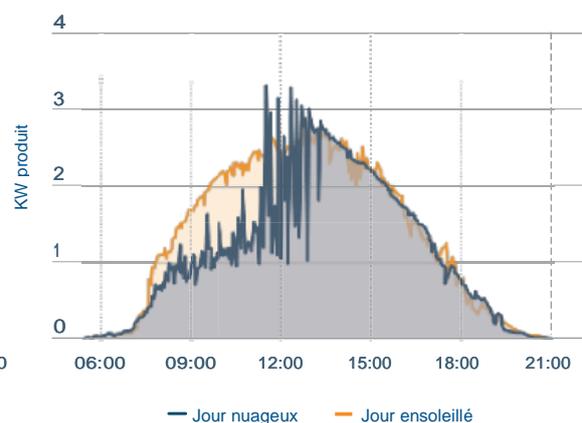


## EFFETS SAISONNIERS ET JOURNALIERS DES VARIATIONS DU SOLEIL SUR LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ D'UNE PETITE INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE EN ITALIE CENTRALE

SAISON



JOUR



Source : CESI S.p.A.

## RECOMMANDATIONS

L'utilisation croissante des énergies renouvelables variables présente encore un certain nombre de difficultés. Des solutions technologiques efficaces et abordables contribueront à réduire ou à résoudre ces problèmes. Des politiques appropriées, dont la réglementation et le *market design*, jouent un rôle fondamental dans le développement des énergies renouvelables variables et leur intégration efficace dans les systèmes électriques.

Les solutions aux principaux défis peuvent être divisées en deux catégories complémentaires : les **politiques** et les **technologies**.

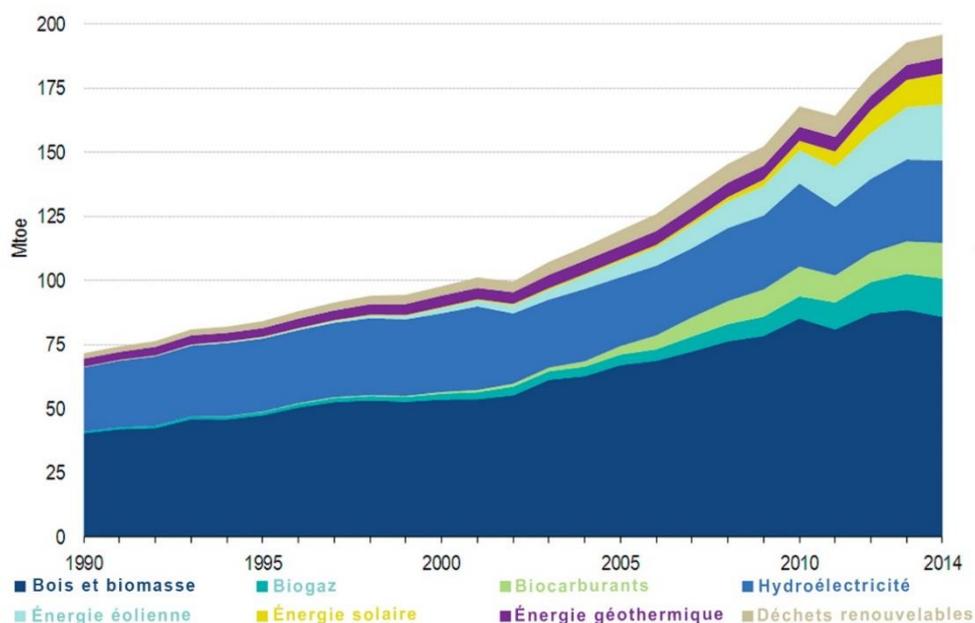
### Les politiques et le *market design*

- **Une approche holistique et de long terme** de la conception des systèmes est essentielle quand on prévoit d'intégrer des énergies renouvelables variables. Le réseau électrique de chaque pays est unique et dépend des sources d'énergie primaire, de la localisation et de la taille des centrales, des systèmes de transport et de distribution, des conditions financières, des coûts et du comportement des consommateurs.
- **Market redesign** : les décideurs politiques doivent concevoir des règles de marché pour assurer un système électrique plus durable conformément aux objectifs du trilemme, notamment par des réglementations clairement définies en matière d'émissions de CO<sub>2</sub>.
- **L'introduction de marchés de capacité** peut aider à assurer la sécurité de l'offre car les marchés basés uniquement sur l'énergie (*energy-only*) sont souvent insuffisants dans des systèmes avec une part importante d'énergies renouvelables variables.
- **Des ajustements à l'actuel *market design*** peuvent être efficaces, par exemple :
  - **des zones d'équilibrage plus grandes** : le partage des conséquences de la variabilité et des erreurs de prévision de charge au sein d'une région plus large permet une réduction naturelle des coûts d'équilibrage du système.
  - **l'agrégation des offres** de différentes centrales sur le marché peut faciliter la réduction de la variabilité globale de l'offre électrique et ainsi réduire les erreurs de prévision et les besoins d'équilibrage du système.
  - **les services système** peuvent être fournis par des énergies renouvelables variables, même en l'absence de soleil et de vent, par de nouvelles technologies d'électronique de puissance. Les responsabilités d'équilibrage du système doivent être partagées équitablement entre les participants au marché, y compris les producteurs d'énergies renouvelables variables.
  - **la planification horaire et infra-horaire** doit prendre en compte les limites techniques des centrales conventionnelles pour une utilisation plus efficace des capacités de transport et de production disponibles.
  - **la tarification nodale** démontre les avantages d'un choix approprié de localisation d'une centrale électrique renouvelable et, par conséquent, d'une intégration plus souple des technologies de production renouvelable variable.
- **Considérer les coûts** : les décideurs politiques et industriels sont encouragés à effectuer des analyses techniques et économiques approfondies avec une évaluation complète qui, en plus du CAPEX et des coûts d'exploitation et de maintenance des énergies renouvelables variables, incluent les coûts associés de l'ensemble du système électrique.

## Technologies

- **Améliorer les prévisions météorologiques** : les méthodologies de prévision météorologique doivent être développées pour obtenir une meilleure précision.
- **Des procédures avancées d'exploitation pour optimiser la capacité de réserve et la flexibilité de la production conventionnelle** devraient être introduites pour gérer l'intermittence et la variabilité.
- **La réponse de la demande**, c'est-à-dire l'ajustement à court terme de la demande pour faire face à la pénurie temporaire ou à l'excès de production d'électricité provenant des énergies renouvelables variables, doit être davantage développée.
- **Les technologies de stockage de l'énergie** peuvent changer la donne et contribuer à relever le défi de l'intermittence. Voir à ce sujet le rapport du Conseil Mondial de l'Énergie « Stockage de l'électricité : passer du coût à la valeur » : [http://wec-france.org/DocumentsPDF/Etudes\\_CME/E-storage\\_report\\_2016.pdf](http://wec-france.org/DocumentsPDF/Etudes_CME/E-storage_report_2016.pdf).
- **Un développement des réseaux de transport et de distribution**, y compris des interconnexions transfrontalières, peut s'avérer nécessaire, ainsi qu'une coopération opérationnelle optimale entre les TSO (*Transport System Operator*) et les DSO (*Distribution System Operator*).

## ZOOM EUROPÉEN (d'après des données Eurostat et le rapport ENTSO-E)

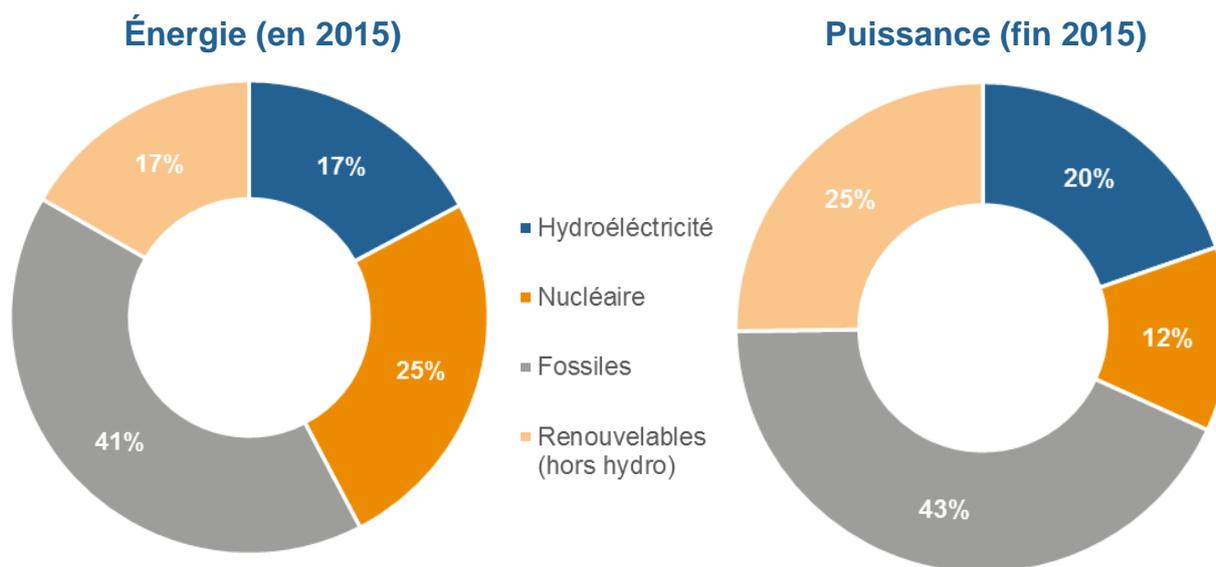


Entre 1990 et 2014, la production totale d'électricité à partir de sources renouvelables a augmenté de 191 %. Bien qu'en 2014 l'énergie hydroélectrique soit restée la première source renouvelable d'électricité de l'UE-28 (43,9 % du total), sa croissance est restée sensiblement la même qu'il y a dix ans.

La hausse de l'électricité produite à partir d'énergies renouvelables est particulièrement due au développement des biocarburants solides dont la part a presque doublé (1,8) entre 2004 et 2014, de l'énergie éolienne, qui a plus que triplé (3,3) sur cette même période et de l'énergie solaire. La production d'électricité à partir de l'énergie solaire a en effet connu un développement spectaculaire : elle est passée d'à peine 0,7 TWh en 2004 – dépassant l'énergie géothermique en 2008 – à 92,3 TWh en 2014 ; et sa part dans l'ensemble de l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables est passée de 0,1 % à 10,0 %.

Fin 2015, la puissance installée totale en Europe (au sens de l'ENTSO-E, soit les 28 pays de l'Union européenne, plus la Norvège, la Suisse, l'Islande et les pays de l'ex-Yougoslavie : Serbie, Bosnie-Herzégovine, Monténégro, Macédoine) s'élevait à 1 030 GW et la production à 3 320 TWh. Les capacités sont stables pour le nucléaire et l'hydroélectricité, croissantes pour les autres renouvelables (+ 20 GW en 2015, soit + 8,6 % par rapport à 2014) et décroissantes pour les sources fossiles.

La production d'hydroélectricité, qui a diminué en 2015 en raison d'une faible pluviométrie, a été compensée par une plus forte production à partir d'énergies renouvelables (+ 17,3 %), principalement portée par les énergies solaire et éolienne, qui ont respectivement augmenté de 24,6 % et 3,1 %.



En moyenne sur les cinq dernières années, les durées annuelles d'utilisation sont de 6 800 heures pour le nucléaire, de 3 200 heures pour les sources fossiles, de 2 800 heures pour l'hydroélectricité et de 2 000 heures pour les autres renouvelables (rappelons que  $365 \times 24 = 8\,760$  heures).

## LE CONSEIL FRANÇAIS DE L'ÉNERGIE

Fondé en 1923, le Conseil Français de l'Énergie (CFE) est le comité national français du Conseil Mondial de l'Énergie. Le Conseil Français de l'Énergie est une association, reconnue d'utilité publique, qui a pour objectif de promouvoir la fourniture et l'utilisation durables de l'énergie pour le plus grand bien de tous. Il regroupe des acteurs français (entreprises, administrations, organisations professionnelles ou universités) impliqués dans des réflexions qui privilégient les dimensions d'accessibilité, de disponibilité et d'acceptabilité de l'énergie dans une perspective mondiale : toutes les ressources et les technologies de l'énergie sont représentées.

Le Conseil Français de l'Énergie soutient les recherches en économie de l'énergie et participe aux débats énergétiques, notamment par l'intermédiaire de publications et de conférences. Il assure la diffusion, des résultats des recherches qu'il a financées et des travaux du Conseil Mondial de l'Énergie. Le Français étant une des deux langues officielles du Conseil Mondial de l'Énergie, le Conseil Français de l'Énergie contribue à la promotion de la francophonie en diffusant en français ces études.

Le Conseil Mondial de l'Énergie rassemble plus de 3 000 organisations et représente une centaine de pays dont les deux tiers de pays en développement.

Copyright © 2016 Conseil Mondial de l'Énergie (World Energy Council). Tous droits réservés. Toute ou partie de cette publication peut être utilisée ou reproduite à condition que la mention suivante soit intégrée dans chaque copie ou diffusion : « Avec l'autorisation du Conseil Français de l'Énergie, Paris, [www.wec-france.org](http://www.wec-france.org) ».

Directeur de la publication : Jean Eudes Moncomble, Secrétaire général du Conseil Français de l'Énergie.

Version originale anglaise publiée par le Conseil Mondial de l'Énergie, enregistré en Angleterre et au Pays de Galles No. 4184478, Registered Office, 62-64 Cornhill, London EC3V 3NH, United Kingdom