

4. Vecteurs énergétiques

4.1 – L'électricité

Partie 2 - Les énergies renouvelables intermittentes (EnRI)

Daniel R. Rousse, Ph.D., Ing.

Département de génie mécanique

Antoine Brégaint, M.Sc.A.

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Définition des EnRI
- Tendances actuelles
- Comparaison des technologies énergétiques
- Crédit de capacité
- Conclusion

Plan de cette présentation

- ***Introduction et objectifs***
- Définition des EnRI
- Tendances actuelles
- Comparaison des technologies énergétiques
- Crédit de capacité
- Conclusion

Introduction et objectifs

- Les énergies renouvelables sont de plus en plus sollicitées pour la production d'électricité.
- Il est essentiel de définir ces nouvelles sources de production d'électricité en vue d'étudier l'impact de leur intégration dans les mix électriques.

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- ***Définition des EnRI***
- Tendances actuelles
- Comparaison des technologies énergétiques
- Crédit de capacité
- Conclusion

Question



ENR2020

- Parmi ces caractéristiques, lesquelles définissent les énergies renouvelables intermittentes ?
 - A. Non pilotables
 - B. Prévisibles
 - C. Fluctuantes
 - D. Onéreuses
 - E. Assurées

Définition des EnRI

- L'intermittence d'une énergie renouvelable (EnR) réside dans son incapacité à produire de l'électricité de manière constante.
- Les énergies éoliennes, solaires photovoltaïques et une partie des énergies océaniques peuvent être caractérisées comme intermittentes .

Définition des EnRI

- Les caractéristiques de ces énergies sont les suivantes :
 - **Non pilotable** : impossible de suivre la charge et d'ainsi répondre fidèlement à la consommation.
 - **Non assurée** : l'absence de conditions climatiques favorables empêche la production d'électricité (vent pour l'éolien, soleil pour le solaire PV...).

Définition des EnRI

- Les caractéristiques de ces énergies sont les suivantes :
 - **Fluctuantes** : la production n'est pas stable sur la durée, elle peut être très importante à l'instant t et drastiquement plus faible à l'instant $t+1$.
 - **Difficilement prévisibles** : l'incertitude de prévision des conditions météorologiques rend difficile la prévision des productions d'EnRI.

Plan de cette présentation

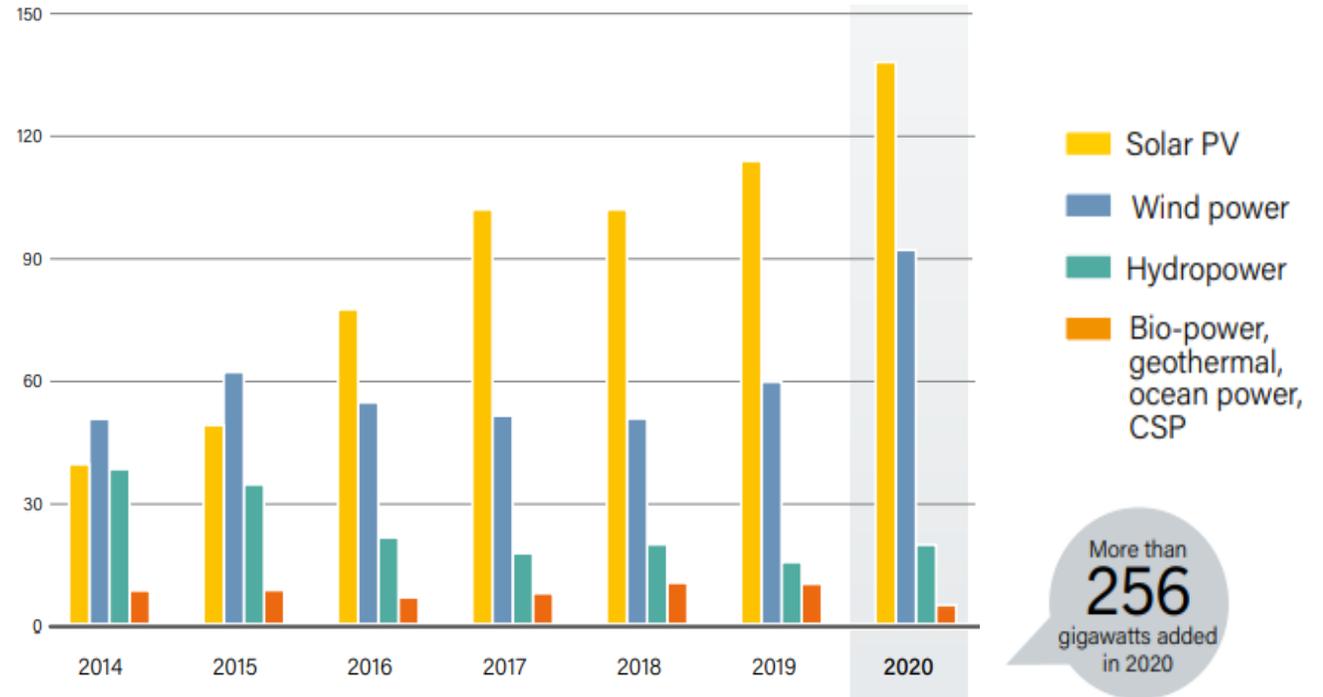
- Introduction et objectifs
- Définition des EnRI
- ***Tendances actuelles***
- Comparaison des technologies énergétiques
- Crédit de capacité
- Conclusion

Tendances actuelles

- La capacité installée d'EnR augmente chaque année (+256 GW en 2020).
- Parmi elles, une très large partie est intermittente (plus de 85 %).
- Cette tendance devrait se confirmer dans les années à venir avec la hausse des investissements et le déploiement de l'éolien maritime.

Tiré de : REN21 Global Status Report

Additions by technology (Gigawatts)



Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Définition des EnRI
- Tendances actuelles
- ***Comparaison des technologies énergétiques***
- Crédit de capacité
- Conclusion

Comparaison des technologies énergétiques

- Peut-on entièrement remplacer 200 MW de centrale à charbon par 200 MW d'éolien ?
- Est-ce que 200 MWh d'électricité provenant d'une centrale à charbon rendent le même service que 200 MWh d'éolien ?
- Est-ce que 200 MWh d'électricité photovoltaïque rendent le même service que 200 MWh d'éolien ?

Comparaison des technologies énergétiques

- Ces réponses soulèvent d'autres questions et notamment : Comment concevoir un système électrique fiable avec des technologies différentes de celles que l'on a utilisées pendant le XX^e siècle?
- Il est alors légitime de s'interroger sur les méthodes de comparaison des différentes technologies de production énergétiques.

Comparaison des technologies énergétiques

- Comme discuté au thème 4.1.1, il existe de nombreux facteurs à prendre en compte pour choisir les moyens de production d'électricité sur un réseau :
 - Au niveau technique :
 - Pilotabilité ;
 - Réponse inertielle ;
 - Temps de montée et descente en puissance ;
 - Puissance réactive, etc...
 - Au niveau socio-économique :
 - Coût global ;
 - Coût marginal ;
 - Empreinte carbone, etc...

Comparaison des technologies énergétiques

- Comparer deux moyens de production utilisant des technologies différentes est donc toujours délicat. On trouve souvent des comparaisons se reposant sur :
 - La capacité installée (en W)
 - L'énergie produite (en Wh/an)
 - Le coût moyen actualisé – ou LCOE (en USD/Wh)
 - L'empreinte carbone (en $\text{gCO}_{2,\text{éq}}/\text{Wh}$)
 - Densité surfacique de puissance (en W/m^2)
- Il faut savoir critiquer les angles morts de chacune des valeurs de comparaison ci-dessus.

Comparaison des technologies énergétiques

- Critiques possibles :
 - On peut par exemple noter que les comparaisons ne se font que sur les puissances réelles (en W), alors qu'on a vu que la puissance réactive (en VA) est également importante sur le réseau.
 - Concernant les coûts et empreintes carbone, on peut noter que les calculs ne prennent quasiment jamais en compte les adaptations du réseau nécessaires à chaque technologie.
 - Maillage différent si production très diffuse sur le territoire, ajout de capacité de stockage, ajout de volant d'inertie, etc
 - Les coûts des technologies n'internalisent pas la gestion des déchets.
 - Quel coût pour le recyclage des PV en fin de vie, du béton des barrages hydro, de la nécessaire capture et stockage du CO₂ émis par les centrales à gaz, etc ?

Comparaison des technologies énergétiques

- Aucune valeur seule n'est parfaite pour comparer deux technologies entre elles.
- Une autre valeur est néanmoins utilisée dans le cas particulier de l'intégration des EnR : Le crédit de capacité.

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Définition des EnRI
- Tendances actuelles
- Comparaison des technologies énergétiques
- ***Crédit de capacité***
- Conclusion

Crédit de capacité

- Définition : Part de la nouvelle capacité installée qui peut remplacer la capacité des moyens de production classiques (pilotable) sans mettre en danger la sûreté de fonctionnement du réseau. [en %]
- Ainsi, un crédit de capacité de 50% signifie que 100 MW nouvellement installés permet de se passer de 50 MW de moyens pilotables préalablement existants.

Crédit de capacité

- Exemple de crédit de capacité de l'éolien :

$$CC = \frac{U}{V + \delta} \left(\frac{FC_{\text{éolien}}}{R_{\text{systeme}}} \right) (1 + W\delta \exp(-Y(V + \delta)(x - 1)))$$

si $x > 1\%$

$$CC = \frac{U}{V + \delta} \left(\frac{FC_{\text{éolien}}}{R_{\text{systeme}}} \right) (1 + W) \quad \text{si } x \leq 1\%$$

Tiré de : L.M.R. Gomez, 2012,
Intégration de la production
éolienne aux réseaux
électriques : approches
techniques et économiques,
Cf annexe A2 pour plus de
détails sur la formule

x le taux de pénétration de l'éolien (en % de la demande de pointe)

R_{systeme} la fiabilité des centrales conventionnelles (souvent pris égal à 85 %)

δ le coefficient de dispersion (0 pour une dispersion parfaite et 1 pour une dispersion nulle)

U , V , W et Y sont déterminés en vue d'obtenir la meilleure corrélation

$FC_{\text{éolien}}$ le facteur de capacité éolien

Question



ENR2020

- Selon vous, dans quelle tranche se situe le crédit de capacité de l'éolien terrestre ?
 - A. De 0% à 10%
 - B. De 15% à 25%
 - C. De 40% à 50%
 - D. De 60% à 70%
 - E. Il n'est pas possible de répondre à cette question

Crédit de capacité

Thèse de Camille Cany, Université de Paris-Saclay,
CentraleSupélec, 2017¹

GWe	Crédits de capacité
Nucléaire	97%
Hydraulique	97%
CCGT	97%
Energies renouvelables thermiques	97%
Pointe OCGT	97%
Eolien terrestre	6%
Eolien en mer	10%
Solaire	0,4%

Tableau IV—7 : Crédits de capacités, d'après (Keppler and Cometto, 2012)

CCGT: Centrale à gaz à cycle combiné (en anglais, combined cycle gas turbine)

OCGT: Turbine à combustion au gaz (en anglais, open cycle gas turbine)

¹ Données obtenues pour le mix français basé sur le nucléaire pour un taux de pénétration de l'éolien et du solaire de 16%.

- Ces valeurs sont à prendre avec du recul.
- Dans IRENA 2018², on indique **5%** pour le solaire, avec des réserves toutefois.

² IRENA, 2018, Planification et perspectives pour les énergies renouvelables: AFRIQUE DE L'OUEST

Crédit de capacité

- Pour l'éolien :
 - Crédit de capacité non nul malgré certaines périodes de l'année sans vent ;
 - Pour de faibles taux de pénétration, le crédit de capacité correspond environ au facteur de charge, puis tend vers la production éolienne minimale pour de forts taux de pénétration.

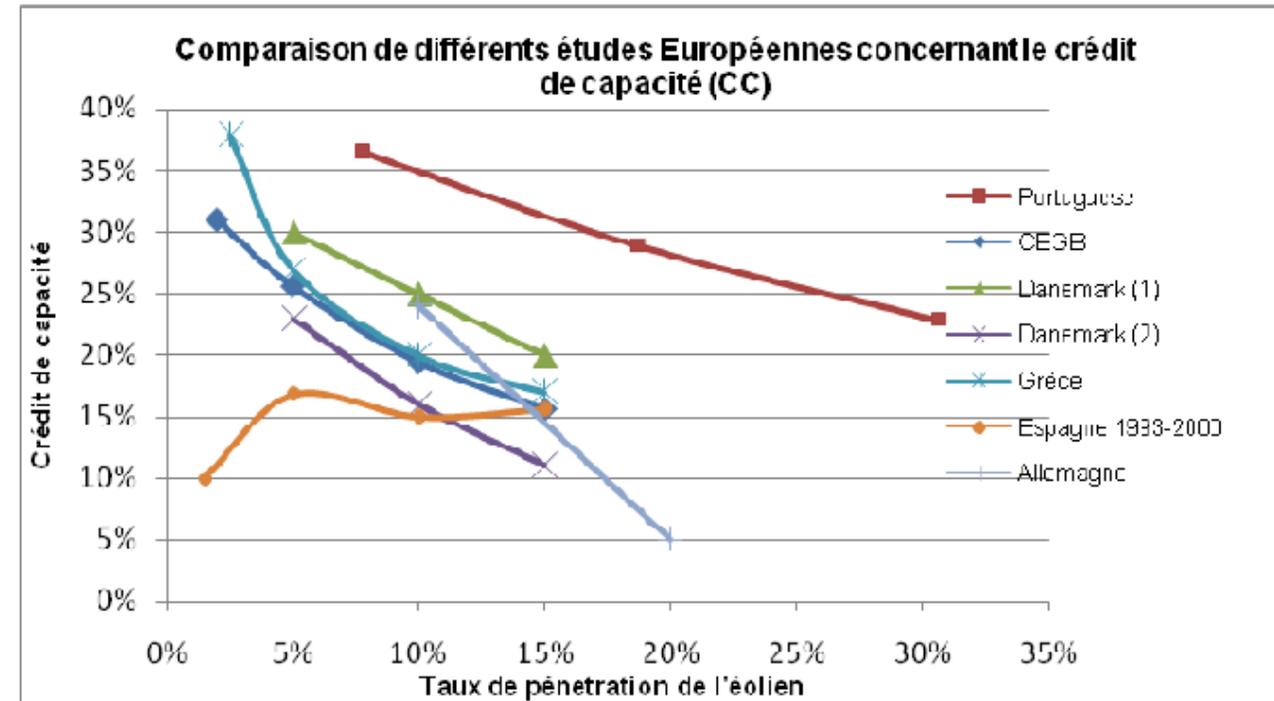


Figure 4-23 A propos des diverses études sur le Crédit de Capacité⁷⁹

Tiré de : L.M.R. Gomez, 2012, Intégration de la production éolienne aux réseaux électriques : approches techniques et économiques

Crédit de capacité

- Pour le PV :

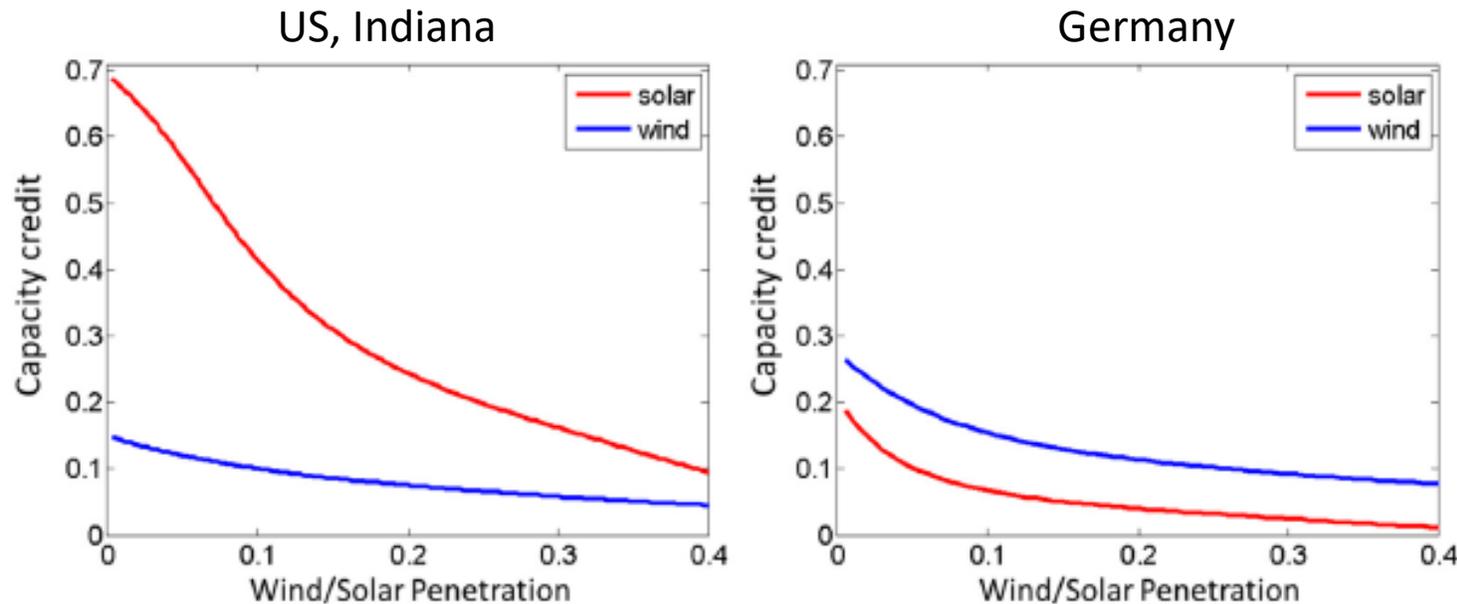


Fig. 6. The capacity credit (defined in Section 2) for different mixes and penetration of wind and solar PV for US Indiana (left) and Germany (right).

Tiré de : Ueckerdt & al, 2015, Analyzing major challenges of wind and solar variability in power systems

- Le CC est beaucoup plus faible et diminue lorsque le taux de pénétration augmente.

Crédit de capacité

- Le crédit de capacité : à retenir
 - Le crédit de capacité d'un réseau diminue avec le taux de pénétration d'énergies renouvelables intermittentes.
 - Le crédit de capacité varie en fonction du mix énergétique existant du réseau.
 - Par exemple, des centrales hydroélectriques ou au charbon ne permettent pas de compenser aussi bien l'ajout de capacités intermittentes.

Crédit de capacité

- On note que toutes les courbes de crédit de capacité ne se projettent pas plus loin que 40% - 50% de taux de pénétration. La possibilité de systèmes électriques 100% renouvelables fait débat dans la communauté scientifique (à l'exception des territoires possédant de grandes capacités hydrauliques, de biomasse ou de géothermie : Québec et Islande typiquement)
 - Cf :
 - Heard & al., 2017, 'Burden of proof: A comprehensive review of the feasibility of 100% renewable-electricity systems', RSER
 - Brown & al., 2018, 'Response to 'Burden of proof: A comprehensive review of the feasibility of 100% renewable-electricity systems'', RSER

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Définition des EnRI
- Tendances actuelles
- Comparaison des technologies énergétiques
- Crédit de capacité
- ***Conclusion***

Conclusion

- La capacité des énergies renouvelables à remplacer des énergies pilotables est très limitée et est mesurée par le crédit de capacité.
- Lorsque le taux de pénétration augmente, le crédit de capacité diminue, ce qui risque de poser des problèmes pour assurer un réseau électrique fiable.
- Les problématiques engendrées par l'intégration des EnRI au réseau électrique font l'objet de la présentation 4.1.3.



Merci de votre attention !

Lorsque cette capsule de formation est présentée en asynchrone (PDF récupérable sur le site du cours), si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit sur le forum et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

Période de questions

