

REMI

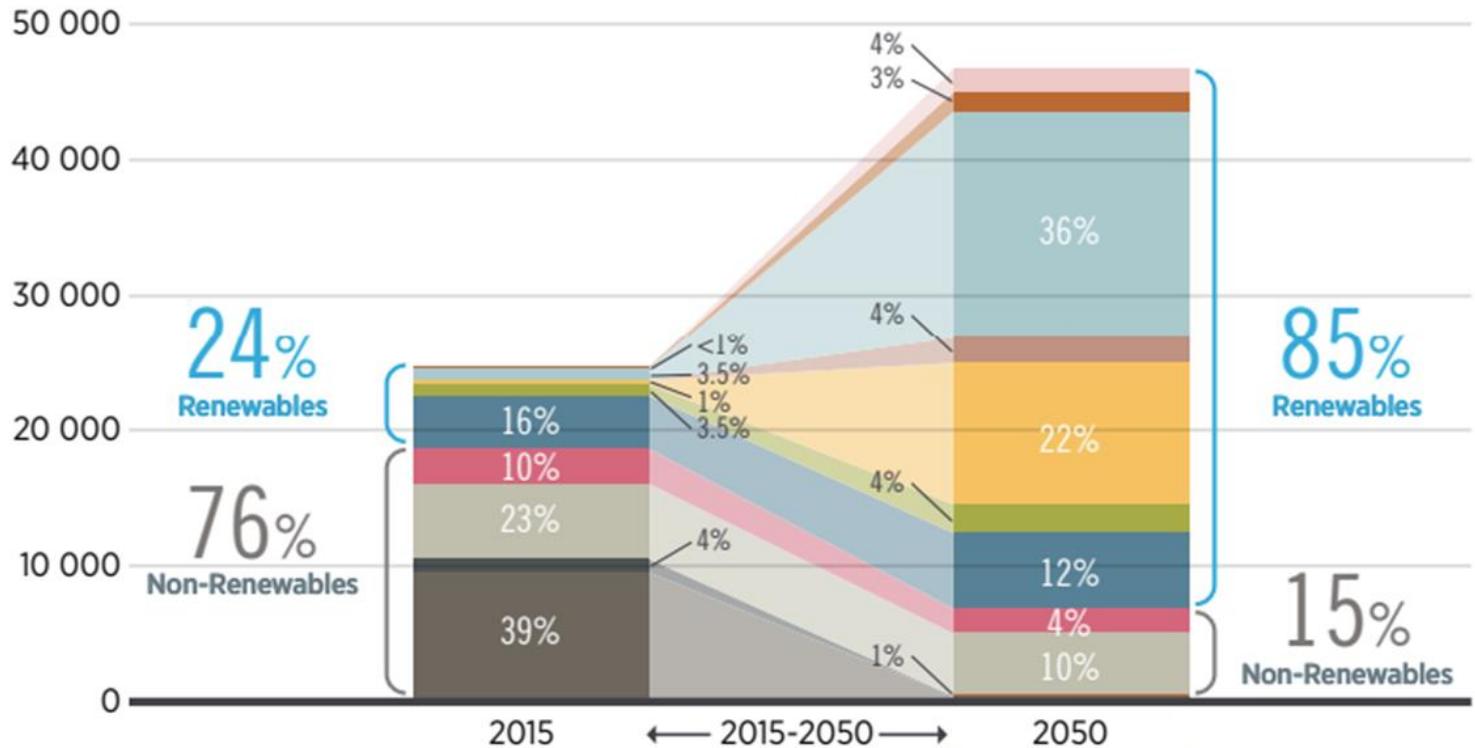
Réseaux Électriques Mondialement Interconnectés

8 décembre 2021

Prof. Damien ERNST and collaborators



Electricity generation (TWh/yr)



Source: IRENA, Global Energy Transformation - A Roadmap to 2050, 2020

Question de recherche

Les méthodologies développées dans le cadre du projet REMI visent à obtenir des éléments de réponse à la question suivante :

Comment déployer les capacités de collectes des énergies renouvelables dans le contexte des grands réseaux électriques interconnectés, en tenant compte de la qualité des gisements, des contraintes de coûts et des cadres régulatoires ?

Une méthodologie holistique et itérative : augmentation progressive de la complexité et du périmètre des questions abordées.

Structure

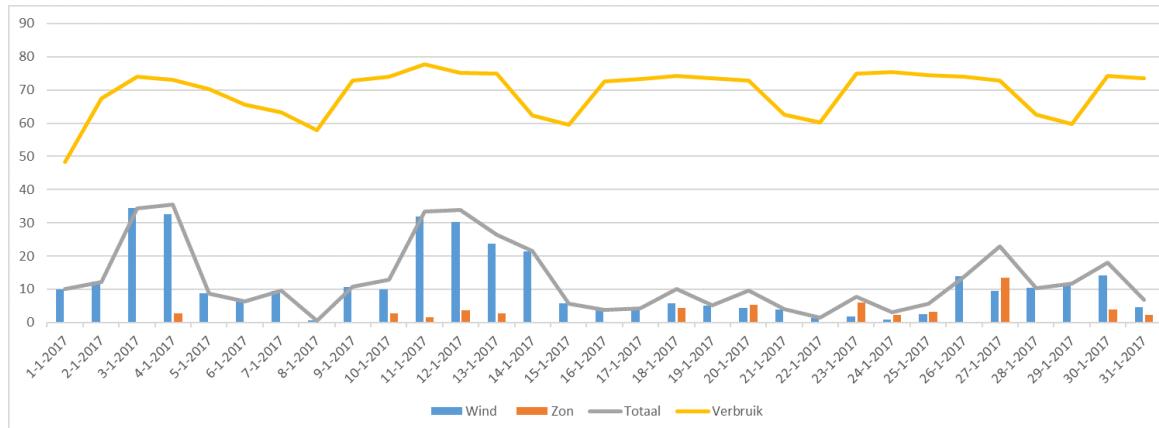
1. Définir l'idée de complémentarité à partir des “fenêtres de temps critiques”
2. Travailler à partir des “fenêtres de temps critiques” afin d'optimiser la complémentarité
3. Optimiser la complémentarité : implications pour les *power systems*
4. Optimiser la complémentarité : implications pour les coûts opérationnels des *power systems*
5. Dépasser la notion d'optimalité pour mieux rejoindre les besoins des décideurs
6. Résultats transversaux et *by-products*
7. Conclusions et perspectives

Méthodologie 1. : Définir l'idée de complémentarité à partir des “fenêtres de temps critiques”

Meth 1. : Définir l'idée de complémentarité à partir des “fenêtres de temps critiques”

Le framework “critical time windows”

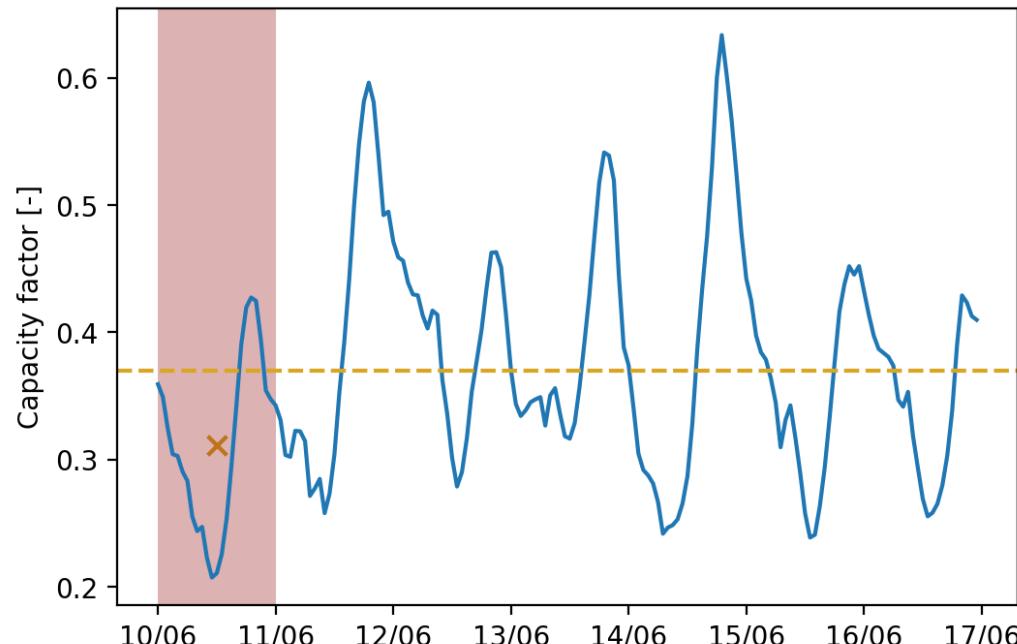
Comment éviter l'occurrence de fenêtres temporelles au cours desquelles la production renouvelable est “trop basse” ?



Meth 1. : Définir l'idée de complémentarité à partir des “fenêtres de temps critiques”

$$\mathcal{W} = \{w_t^\delta | t \in \mathcal{T}, (t + \delta - 1) \in \mathcal{T}\}$$

Une localisation I est considérée comme étant « critique » pendant une fenêtre temporelle w si la qualité de la ressource s'y trouve inférieure à un niveau donné.



Meth 1. : Définir l'idée de complémentarité à partir des “fenêtres de temps critiques”

Une fenêtre temporelle w est considérée comme étant « critique » du point de vue du système **si** plus de c localisations s'y trouvent critiques.

Localisations non-critiques :

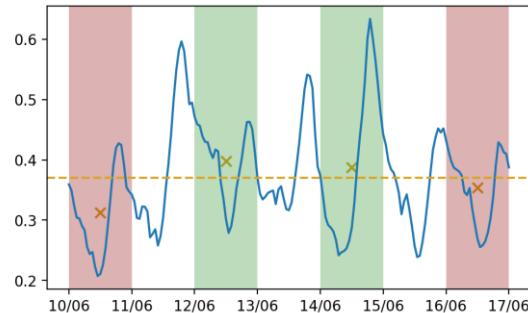
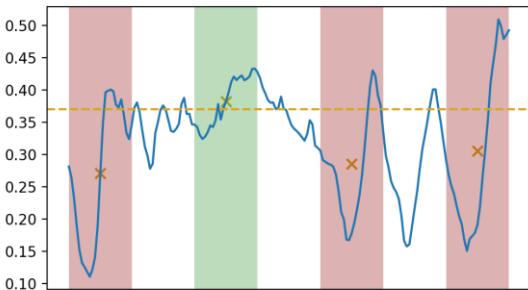
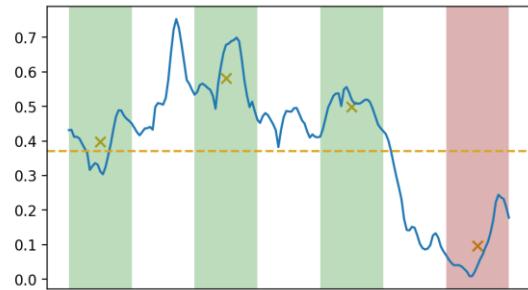
$$\mathcal{J}_w^L = \{l \in L \mid \bar{\pi}_{lw} \geq \alpha\}$$

Fenêtres temporelles non-critiques :

$$\mathcal{W}_C^L = \{w \in \mathcal{W} \mid |\mathcal{J}_w^L| \geq c\}$$

Indice de criticité :

$$f_c(L) = 1 - \frac{|\mathcal{W}_C^L|}{|\mathcal{W}|}$$



Meth 1. : Définir l'idée de complémentarité à partir des “fenêtres de temps critiques”

On étudie l'indice de criticité pour différentes valeurs des paramètres (δ , α , c)



à partir d'un ensemble d'environ ~300 sites éoliens candidats en France continentale et au sud du Groenland

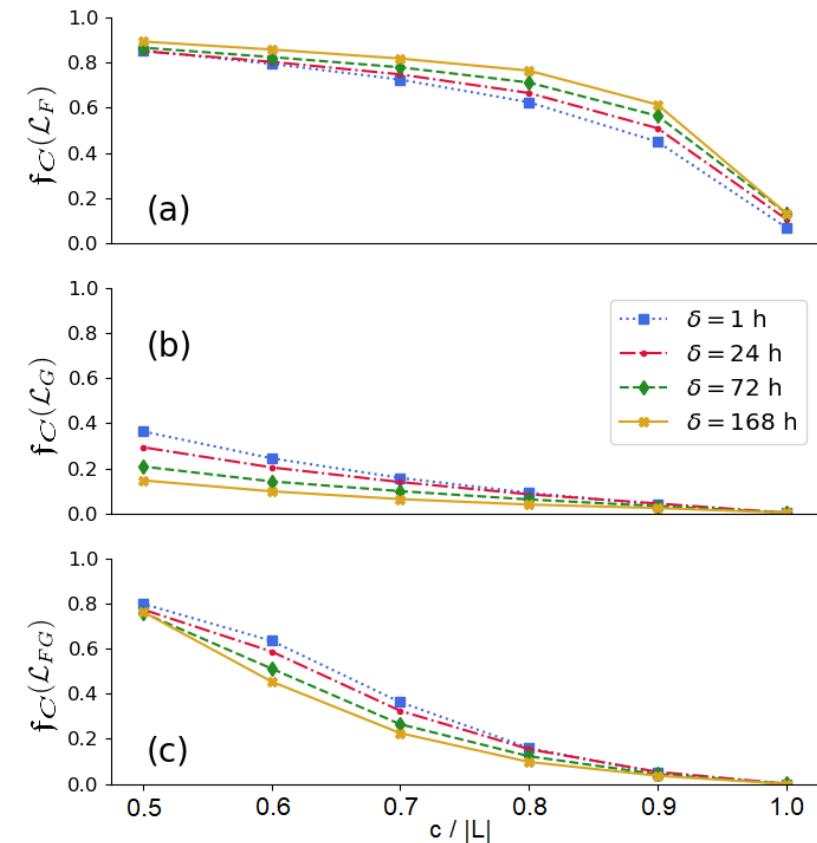
Meth 1. : Définir l'idée de complémentarité à partir des “fenêtres de temps critiques”

Les scores de criticité diminuent à mesure que c augmente.

Cependant, la tendance est moins visible pour le Groenland, ce qui met l'accent sur la qualité des ressources locales.

Le choix d'une valeur de α située entre les CF moyens des deux régions se traduit par une évolution intéressante de l'indice par rapport à δ .

Le couplage des régions conduit à une amélioration significative du score, en particulier pour les plus petites valeurs de c .



Criticality indicator assessment for various δ and c values and an α value of 35%.

Méthodologie 2.

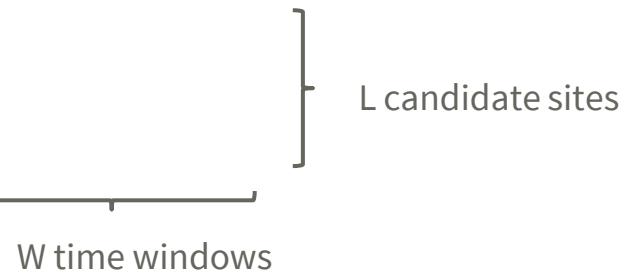
Travailler à partir des “fenêtres de temps critiques” afin d’optimiser la complémentarité

Meth 2. : Travailler à partir des “fenêtres de temps critiques” afin d'optimiser la complémentarité

Peut-on choisir des localisations d'implantations qui minimisent l'occurrence des fenêtres temporelles critiques ?

Point de départ : une matrice D contenant des entrées binaires et de taille $(L \times W)$. Une entrée d_{lw} égale à 1 signifie que l'emplacement l n'est pas critique pendant la fenêtre temporelle w et vice-versa. Cette matrice résulte du pré-traitement et prend déjà en compte δ embarquant ainsi la définition de la criticité locale.

A partir de D , le problème du choix des localisations est formalisé comme un problème de programmation en nombres entiers.



Meth 2. : Travailler à partir des “fenêtres de temps critiques” afin d'optimiser la complémentarité

Dans sa forme la plus élémentaire, on aboutit à un problème d'optimisation de la forme suivante :

$$\begin{aligned} \max_{x_l, y_w} \quad & \sum_{w \in \mathcal{W}} y_w && \text{Criticité de la fenêtre temp. (1 si non-critique, 0 sinon)} \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{l \in \mathcal{L}} D_{lw} x_l \geq c y_w, \quad \forall w \in \mathcal{W}, && \text{Variables des localisations candidate (1 si choisie, 0 sinon)} \\ & \sum_{l \in \mathcal{L}} x_l = k, && \text{Seuil de criticité globale} \\ & x_l \in \{0, 1\}, \quad \forall l \in \mathcal{L}, && \text{Contrainte de cardinalité} \\ & y_w \in \{0, 1\}, \quad \forall w \in \mathcal{W}. && \end{aligned}$$

Meth 2. : Travailler à partir des “fenêtres de temps critiques” afin d’optimiser la complémentarité

La formulation du problème est adaptable afin de tenir compte d’éléments liés à la régulation (partitionnement de l’espace) ou de lieux préexistants :

$$\max_{x_l, y_w} \sum_{w \in \mathcal{W}} y_w$$

$$\text{s.t. } \sum_{l \in \mathcal{L}} D_{lw} x_l \geq c y_w, \quad \forall w \in \mathcal{W},$$

matrice associant localisation l à la sous-région n

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} A_{nl} x_l = k_n, \quad \forall n \in \mathcal{N}_B, \quad \text{Ensemble de sous-régions}$$

Contrainte de cardinalité dans la sous-region n

$$x_l = 1, \quad \forall l \in \mathcal{L}_0, \quad \text{ensemble de localisations ‘legacy’}$$

$$x_l \in \{0, 1\}, \quad \forall l \in \mathcal{L},$$

$$y_w \in \{0, 1\}, \quad \forall w \in \mathcal{W}.$$

Meth 2. : Travailler à partir des “fenêtres de temps critiques” afin d’optimiser la complémentarité

Résoudre ce problème nécessite une stratégie ‘ad-hoc’ via un schéma de relaxation adapté :

$$\begin{aligned}
 \max_{x_l, y_w} \quad & \sum_{w \in \mathcal{W}} y_w \\
 \text{s.t.} \quad & \sum_{l \in \mathcal{L}} D_{lw} x_l \geq c y_w, \quad \forall w \in \mathcal{W}, \\
 & \sum_{l \in \mathcal{L}} A_{nl} x_l = k_n, \quad \forall n \in \mathcal{N}_B, \\
 & x_l = 1, \quad \forall l \in \mathcal{L}_0, \\
 & x_l \in \{0, 1\}, \quad \forall l \in \mathcal{L}, \\
 & y_w \in [0, 1], \quad \forall w \in \mathcal{W}.
 \end{aligned}$$



SA
parameters

```

Require:  $L_0, \mathcal{L}_0, \mathcal{N}_B, \{\mathcal{L}_n\}_{n \in \mathcal{N}_B}, I, N, r, T(i), \mathbf{f}_C$ 
1:  $L \leftarrow L_0 \setminus \mathcal{L}_0$ 
2: for  $n \in \mathcal{N}_B$  do
3:    $\mathcal{L}_n \leftarrow \mathcal{L}_n \setminus \mathcal{L}_0$ 
4: end for
5:  $i \leftarrow 0$ 
6: while  $i < I$  do
7:    $\tilde{\Delta} \leftarrow -\infty$ 
8:    $j \leftarrow 0$ 
9:   while  $j < N$  do
10:     $\hat{L} \leftarrow L$ 
11:     $\mathbf{s} \leftarrow$  vector storing the number of locations to sample per region
12:    for  $n \in \mathcal{N}_B$  do
13:       $S_+ \leftarrow \mathbf{s}(n)$  locations sampled from  $\mathcal{L}_n \setminus L$  uniformly at random
14:       $S_- \leftarrow \mathbf{s}(n)$  locations sampled from  $\mathcal{L}_n \cap L$  uniformly at random
15:       $\hat{L} \leftarrow (\hat{L} \setminus S_-) \cup S_+$ 
16:    end for
17:     $\hat{\Delta} \leftarrow \mathbf{f}_C(\hat{L} \cup \mathcal{L}_0) - \mathbf{f}_C(L \cup \mathcal{L}_0)$ 
18:    if  $\hat{\Delta} > \tilde{\Delta}$  then
19:       $\tilde{L} \leftarrow \hat{L}$ 
20:       $\tilde{\Delta} \leftarrow \hat{\Delta}$ 
21:    end if
22:     $j \leftarrow j + 1$ 
23:  end while
24:  if  $\tilde{\Delta} > 0$  then
25:     $L \leftarrow \tilde{L}$ 
26:  else
27:     $p \leftarrow \exp(\tilde{\Delta} / T(i))$ 
28:    draw  $b$  from Bernoulli distribution with parameter  $p$ 
29:    if  $b = 1$  then
30:       $L \leftarrow \tilde{L}$ 
31:    end if
32:  end if
33:   $i \leftarrow i + 1$ 
34: end while
35:  $L \leftarrow L \cup \mathcal{L}_0$ 
Ensure:  $L, \mathbf{f}_C(L)$ 

```

Relaxation de la contrainte nombre entier

Meth 2. : Travailler à partir des “fenêtres de temps critiques” afin d'optimiser la complémentarité

Nous proposons la même étude de cas que précédemment, pour laquelle on chercher à optimiser le choix de $k = 5$ localisations à travers la France, le Groenland et l'union des deux.



$$\begin{aligned}\delta &= 168h, \\ \alpha &= 35\%, \\ c &= 1,\end{aligned}$$

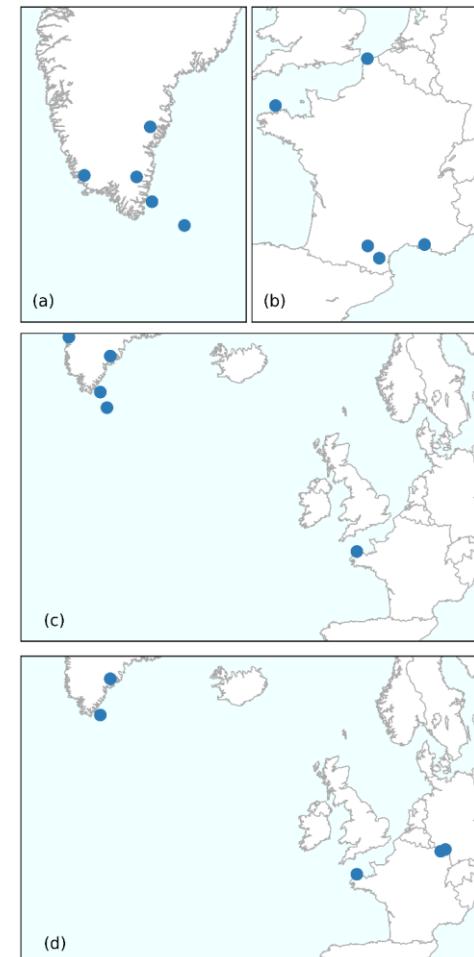
(c'est-à-dire, si un emplacement n'est pas critique, la fenêtre est non critique)

Meth 2. : Travailler à partir des “fenêtres de temps critiques” afin d'optimiser la complémentarité

Les résolutions du problème d'optimisation révèlent des schémas de déploiement tirant parti des régimes de vent locaux (vents catabatiques au Groenland, Mistral et Tramontane en France).

Le couplage des deux régions laisse entrevoir la complémentarité des ressources des deux régions.

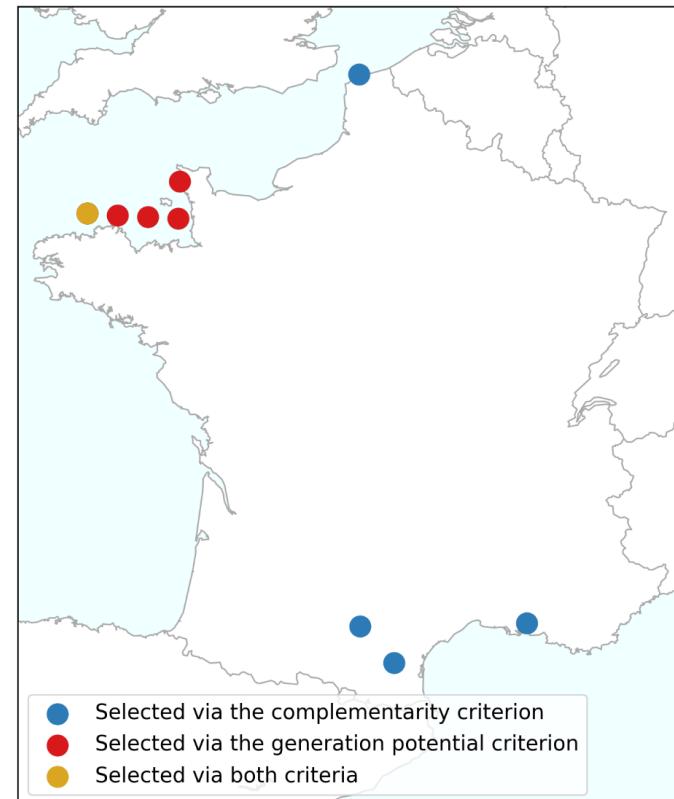
L'application des contraintes de partitionnement a un impact sur les résultats.



Meth 2. : Travailler à partir des “fenêtres de temps critiques” afin d’optimiser la complémentarité

Optimiser la complémentarité (COMP) ou la production (PROD), quelle différence ?

- Un compromis intéressant entre les CF moyens et les scores de criticité : plus précisément, 60 % de fenêtres critiques en moins pour COMP impliquent une facteur de capacité moyen inférieur de 10 %



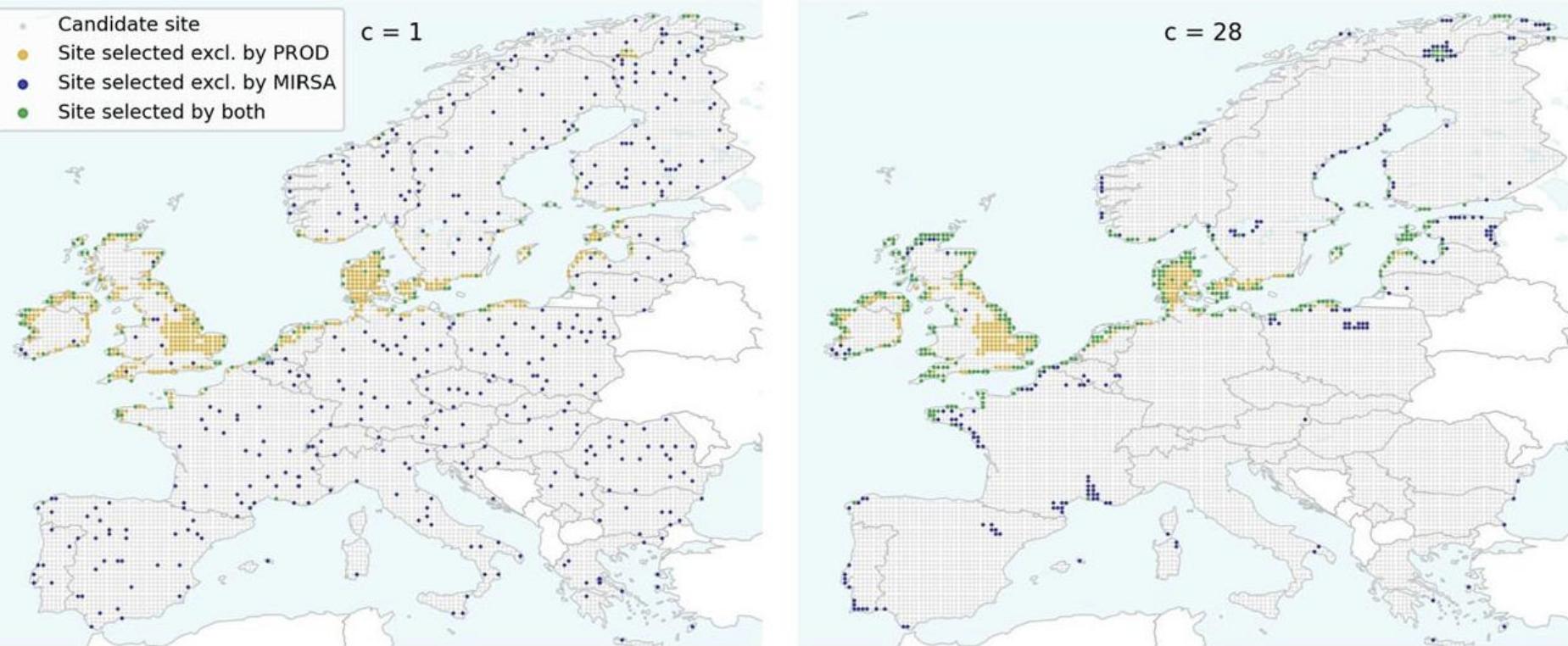
Meth 2. : Travailler à partir des “fenêtres de temps critiques” afin d'optimiser la complémentarité

L'optimisation de la complémentarité spation-temporelle a fait l'objet d'études théoriques qui ont mis à jour un lien avec les fonctions sous-modulaire et les « covering problems ».

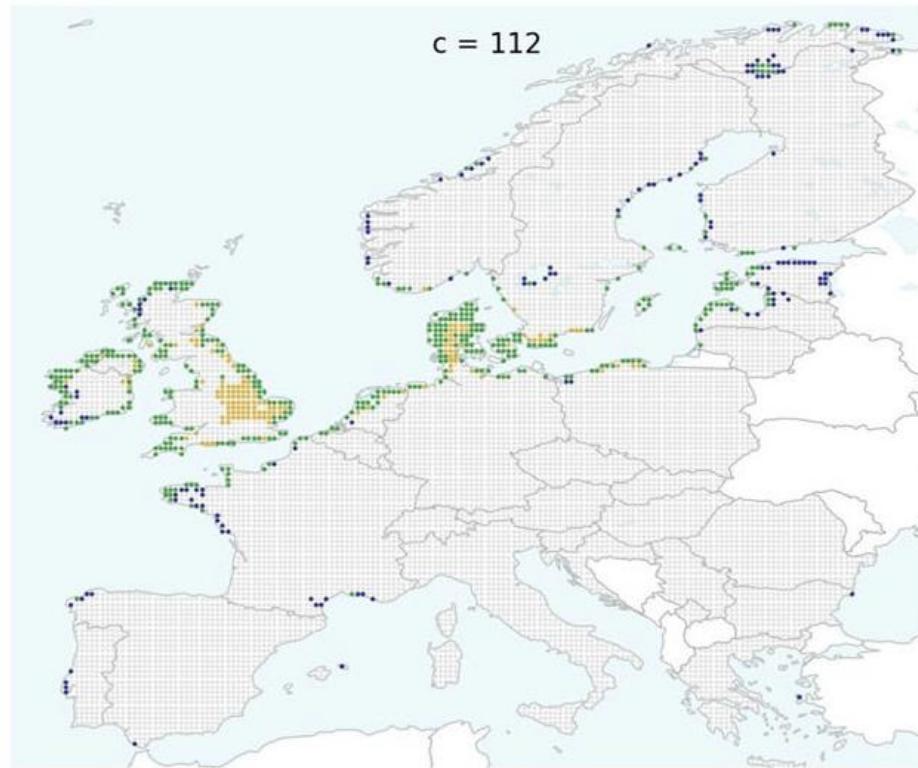
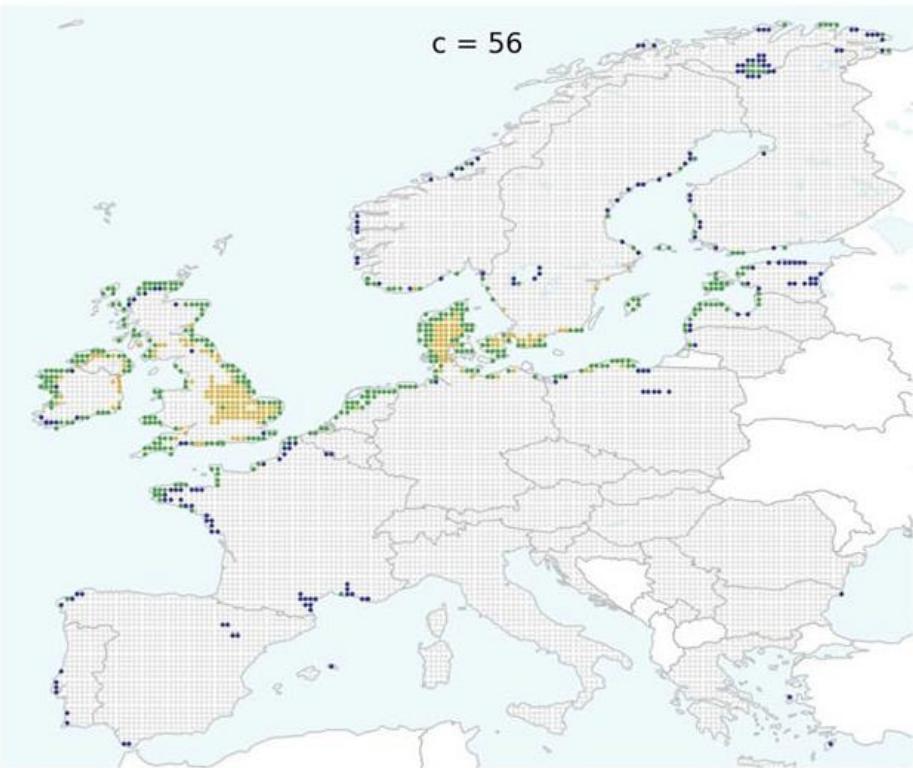
Différentes approches d'optimisation ont été développées et/ou étudiées afin de proposer des algorithmes capables d'aborder le problème de l'optimisation de la complémentarité dans des situations plus réalistes (notamment en terme de nombre de localisations candidates et de fenêtres temporelles).

On propose par après des résultats obtenus dans le cas de gisements de vents on-shore en Europe, avec plus de 10000 localisations candidates et plus de 80000 fenêtres temporelles.

Meth 2. : Travailler à partir des “fenêtres de temps critiques” afin d’optimiser la complémentarité

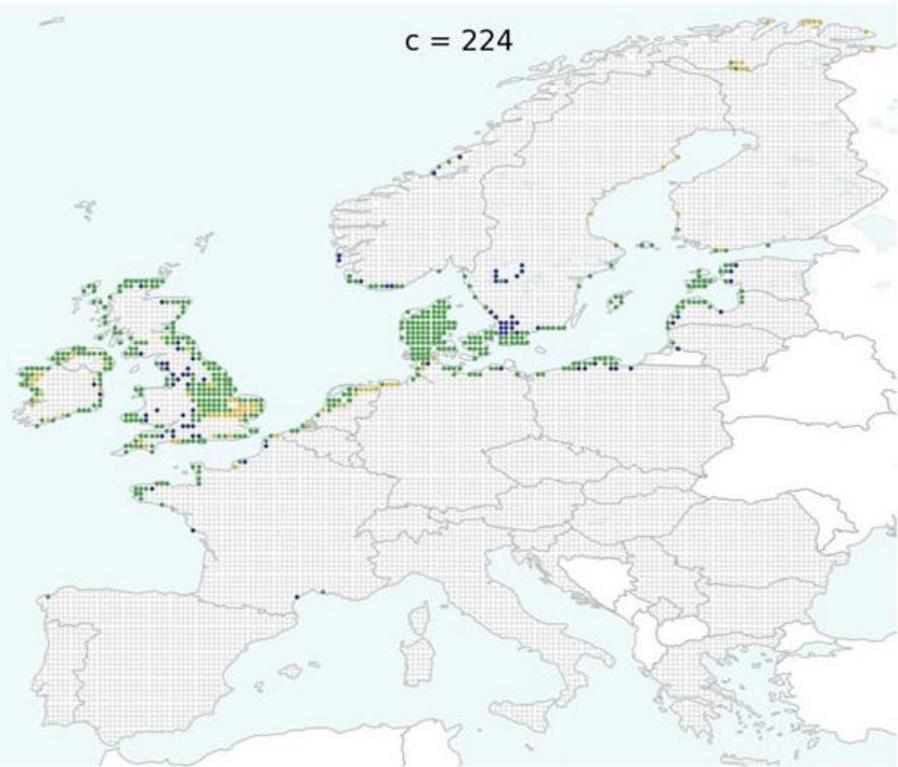


Meth 2. : Travailler à partir des “fenêtres de temps critiques” afin d'optimiser la complémentarité

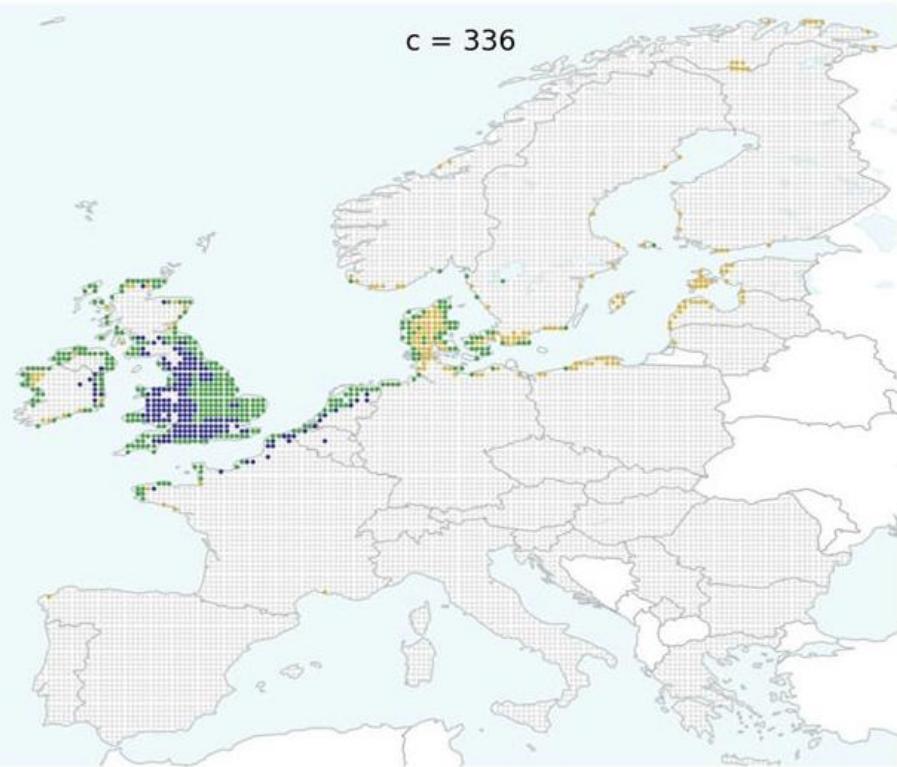


Meth 2. : Travailler à partir des “fenêtres de temps critiques” afin d'optimiser la complémentarité

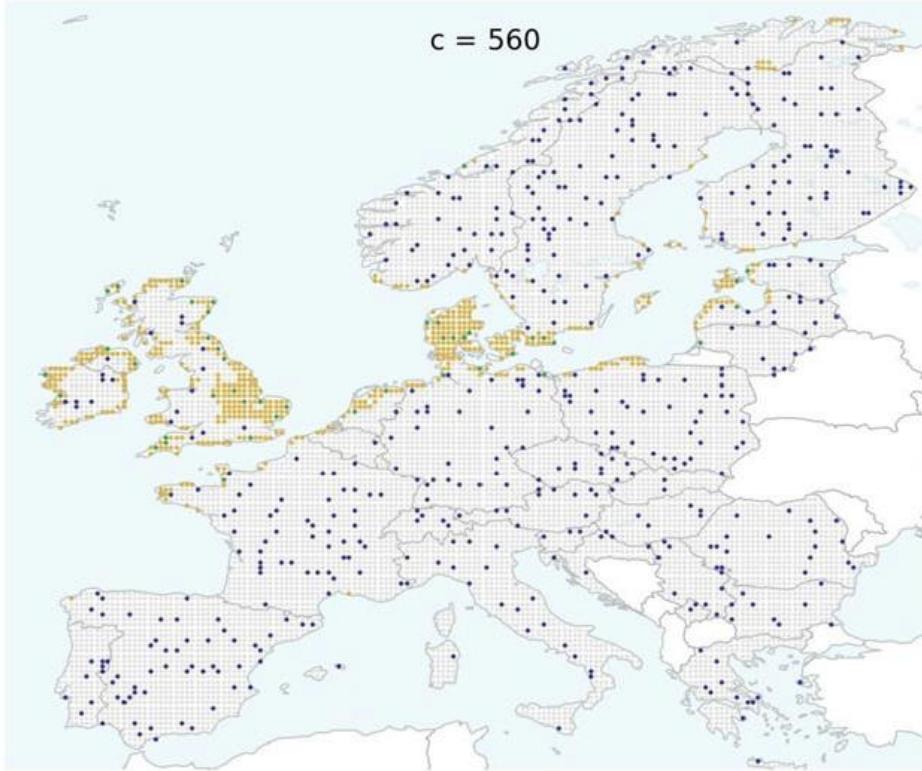
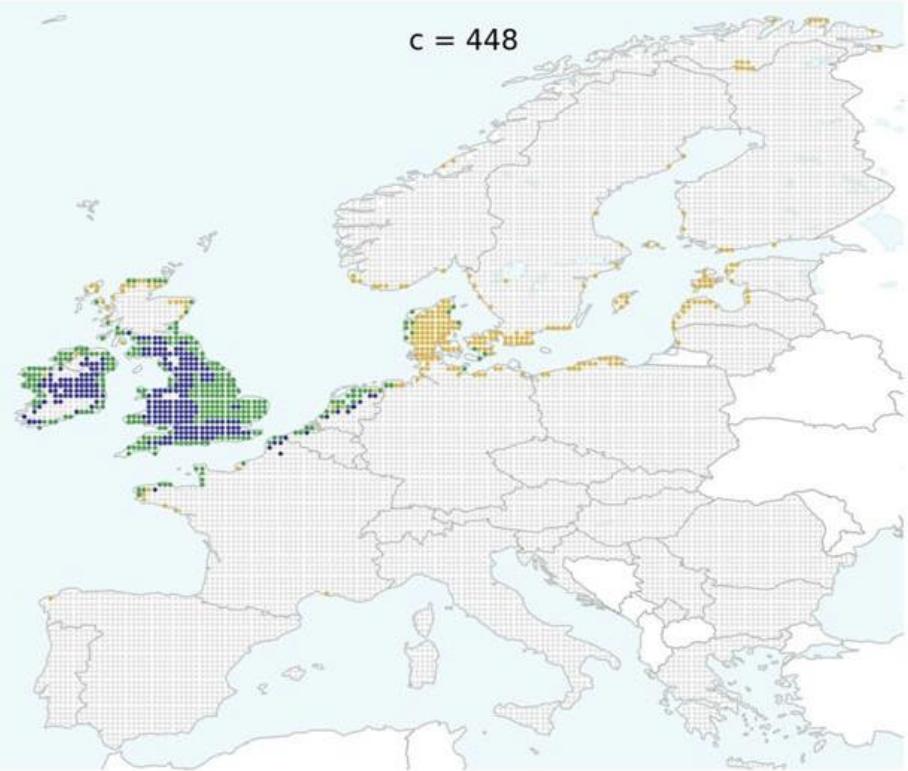
$c = 224$



$c = 336$



Meth 2. : Travailler à partir des “fenêtres de temps critiques” afin d'optimiser la complémentarité



Méthodologie 3.

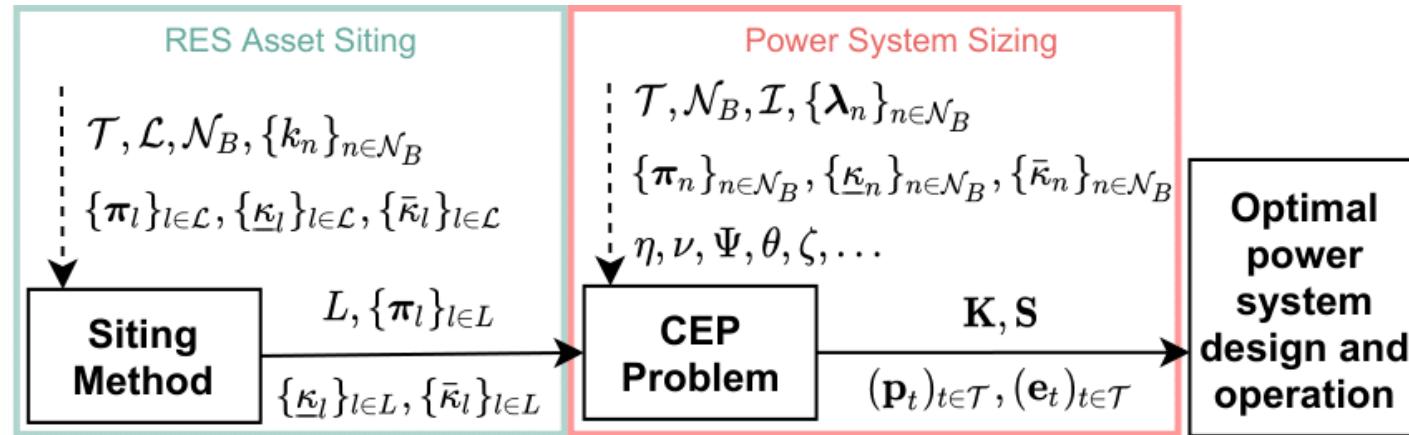
Optimiser la complémentarité : implications pour les power systems

Dans ce qui suit, l'impact de l'implantation des capacités renouvelables sur base des critères de complémentarité des ressources (COMP) sur la planification et l'exploitation des systèmes électriques est comparé à celui d'une stratégie plus conventionnelle, à savoir le choix des localisations qui maximisent la production (PROD).

Meth 3. : du choix des localisations au « power systems » : implications du critère de complémentarité

Une méthode en deux étapes est proposée :

- Dans un premier temps, les choix des lieux d'implantation des capacités renouvelables est réalisé via les algorithmes discutés précédemment (en ignorant totalement tout autre actif du système électrique que les technologies renouvelables).
- Une fois les sites déterminés selon le critère souhaité, ils sont donnés en entrée d'un problème de planification d'extension de capacités qui génère la configuration de système électrique optimale en termes de coût.



Meth 3. : du choix des localisations au « power systems » : implications du critère de complémentarité

Un problème d'optimisation linéaire continu est formalisé.

Un planificateur central dimensionne et exploite le système, avec une « parfaite connaissance de l'avenir » (séries temporelles météo et demande) dans une configuration déterministe, avec un horizon d'optimisation prédéfini.

Les capacités de génération préexistantes sont prises en compte, tandis que l'expansion des capacités est possible dans la limite des potentiels techniques.

Méth 3. : du choix des localisations au « power systems » : implications du critère de complémentarité

$$\begin{aligned}
& \min_{\kappa, s, (p_t)_{t \in \mathcal{T}}, (\epsilon_t)_{t \in \mathcal{T}}} \sum_{\substack{n \in \mathcal{N}_B \\ l \in L_n}} (\zeta^l + \theta_f^l) K_l + \sum_{\substack{n \in \mathcal{N}_B \\ j \in \mathcal{G} \cup \mathcal{R} \cup \mathcal{S}}} (\zeta^j + \theta_f^j) K_{nj} + \sum_{\substack{n \in \mathcal{N}_B \\ s \in \mathcal{S}}} \zeta^s S_{ns} + \sum_{i \in \mathcal{I}} (\zeta^i + \theta_f^i) K_c \\
& + \sum_{t \in \mathcal{T}} \left[\sum_{\substack{n \in \mathcal{N}_B \\ l \in L_n}} \theta_v^l p_{lt} + \sum_{\substack{n \in \mathcal{N}_B \\ g \in \mathcal{G} \cup \mathcal{R}}} \theta_v^g p_{ngt} + \sum_{\substack{n \in \mathcal{N}_B \\ s \in \mathcal{S}}} \theta_v^s (p_{nst}^C + p_{nst}^D) + \sum_{i \in \mathcal{I}} \theta_v^i |p_{it}| + \sum_{n \in \mathcal{N}_B} \theta_v^{ens} p_{nt}^{ens} \right]
\end{aligned}$$

$$\sum_{\substack{n \in \mathcal{N}_B \\ l \in L_n}} p_{lt} + \sum_{g \in \mathcal{G} \cup \mathcal{R}} p_{ngt} + \sum_{s \in \mathcal{S}} p_{nst}^D + \sum_{i \in \mathcal{I}_n^+} p_{it} + p_{nt}^{ens} = \lambda_{nt} + \sum_{s \in \mathcal{S}} p_{nst}^C + \sum_{i \in \mathcal{I}_n^-} p_{it}$$

$$p_{ngt} \leq \pi_{nt} (\kappa_{ng} + K_{ng}), \forall n \in \mathcal{N}_B, \forall g \in \mathcal{G}, \forall t \in \mathcal{T}$$

$$p_{ngt} - p_{ng(t-1)} \leq \Delta_g^+ (\kappa_{ng} + K_{ng}), \forall n \in \mathcal{N}_B, \forall g \in \mathcal{G}, \forall t \in \mathcal{T} \setminus \{0\}$$

$$p_{ngt} - p_{ng(t-1)} \geq -\Delta_g^- (\kappa_{ng} + K_{ng}), \forall n \in \mathcal{N}_B, \forall g \in \mathcal{G}, \forall t \in \mathcal{T} \setminus \{0\}$$

$$\mu_g (\kappa_{ng} + K_{ng}) \leq p_{ngt}, \forall n \in \mathcal{N}_B, \forall g \in \mathcal{G}, \forall t \in \mathcal{T}$$

$$q_{ngt}^{CO_2} = \nu_g^{CO_2} p_{ngt} / \eta_g, \forall n \in \mathcal{N}_B, \forall g \in \mathcal{G}, \forall t \in \mathcal{T}$$

$$\kappa_{ng} + K_{ng} \leq \bar{\kappa}_{ng}, \forall n \in \mathcal{N}_B, \forall g \in \mathcal{G}$$

$$\begin{aligned}
p_{lt} &\leq \pi_{lt} (\underline{\kappa}_l + K_l), \forall l \in L_n, \forall n \in \mathcal{N}_B, \forall t \in \mathcal{T} \\
\underline{\kappa}_l + K_l &\leq \bar{\kappa}_l, \forall l \in L_n, \forall n \in \mathcal{N}_B
\end{aligned}$$

$$p_{nst}^D \leq K_{ns}, \forall n \in \mathcal{N}_B, \forall s \in \mathcal{S}, \forall t \in \mathcal{T}$$

$$p_{nst}^C \leq \phi_s K_{ns}, \forall n \in \mathcal{N}_B, \forall s \in \mathcal{S}, \forall t \in \mathcal{T}$$

$$e_{nst} = \eta_s^{SD} e_{ns(t-1)} + \omega_s \eta_s^C p_{nst}^C - \omega_s \frac{1}{\eta_s^D} p_{nst}^D, \forall n \in \mathcal{N}_B, \forall s \in \mathcal{S}, \forall t \in \mathcal{T}$$

$$\mu_s S_{ns} \leq e_{nst} \leq S_{ns}, \forall n \in \mathcal{N}_B, \forall s \in \mathcal{S}, \forall t \in \mathcal{T}$$

$$\underline{\kappa}_{ns} \leq S_{ns} \leq \bar{\kappa}_{ns}, \forall n \in \mathcal{N}_B, \forall s \in \mathcal{S}$$

$$|p_{it}| \leq (\underline{\kappa}_i + K_i), \forall i \in \mathcal{I}, \forall t \in \mathcal{T}$$

$$\underline{\kappa}_i + K_i \leq \bar{\kappa}_i, \forall i \in \mathcal{I}$$

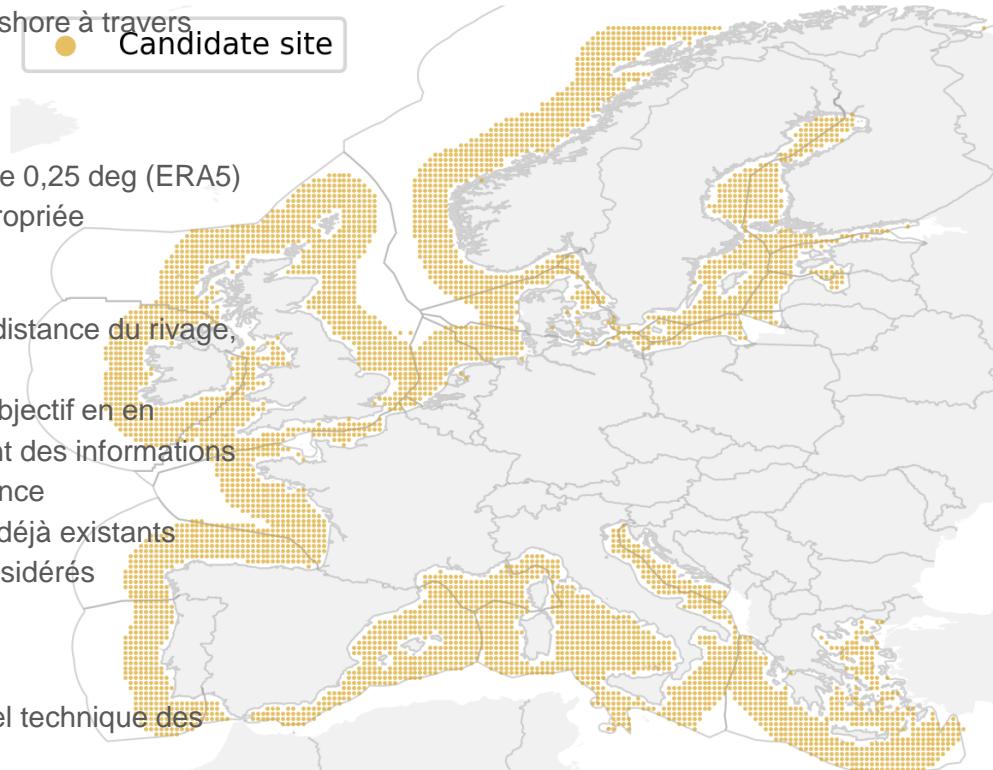
$$\sum_{\substack{n \in \mathcal{N}_B \\ g \in \mathcal{G} \\ t \in \mathcal{T}}} \omega_t q_{ngt}^{CO_2} \leq \Psi^{CO_2}$$

$$\sum_{d \in \mathcal{D}} K_{nd} + \sum_{r \in \mathcal{R}} \Pi_{nr} K_{nr} + \sum_{l \in L_n} \Pi_l K_l \geq (1 + \Phi_n) \hat{\lambda}_n, \forall n \in \mathcal{N}_B$$

Meth 3. : du choix des localisations au « power systems » : implications du critère de complémentarité

L'étude de cas est centrée sur le développement de 450 GW d'éolien off-shore au large des mers européennes (correspondant à 400 sites éoliens offshore à travers l'Europe).

● Candidate site



Données :

- Série temporelle météo de dix ans (2010-2019), ech. en 3h, res. de 0,25 deg (ERA5)
- conversion en CF via une fonction de transfert de parc éolien appropriée

Localisations :

- les sites candidats « trop compliqués » sont écartés (profondeur, distance du rivage, actifs patrimoniaux existants...)
- Travail de conversion de l'objectif (donné en puissance) vers un objectif en cardinalité de localisations effectué via une cartographie nécessitant des informations sur i) la densité de puissance technologique, ii) la surface de référence
- un total d'environ 2500 sites candidats ; ~400 déployés, dont 135 déjà existants
- Deux cas pris en compte : cas partitionnés et non partitionnés considérés

Configuration des paramètres liés à la complémentarité:

- δ de période unitaire (3h), α fonction de la demande et du potentiel technique des sites candidats (voir ci-dessous), c/L fixé à 50%

Meth 3. : du choix des localisations au « power systems » : implications du critère de complémentarité

Le problème CEP s'appuie fortement sur des données accessibles au public (TYNDP, DEA, JRC).

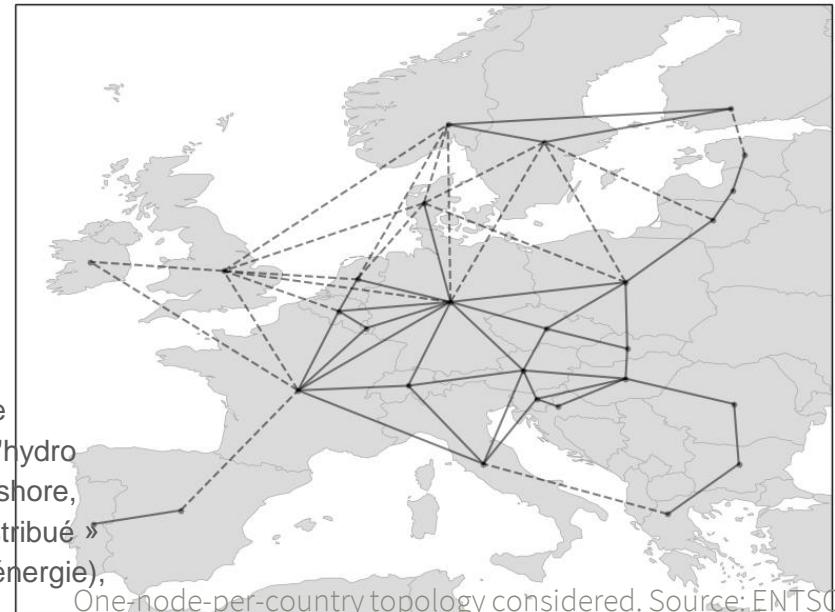
Un système à l'échelle européenne, un nœud par pays, except. les Balkans

Topologie du réseau et courbe de demande :

- Topologie de réseau basée sur TYNDP2018 (avec des ajus. mineurs)
- extension du réseau de transmission limitée au renforcement
- données de demande horaires fournies par ENTSOE

Actifs de production et de stockage :

- Seules les unités éoliennes off-shore et gazières sont dimensionnées
- Les actifs préexistants (emplacement, capacité, etc.) issus i) des ensembles de données du JRC, incl. 61 GW de données nucléaires, 33 GW de RoR, 98 GW d'hydro basée sur des réservoirs et ii) de données propriétaires, incl. 99 GW d'éolien offshore, 160 GW d'éolien onshore, 45 GW de PV à grande échelle et 78 GW de PV « distribué »
- approche *greenfield* pour le stockage Li-Ion (dimensionné en puissance et en énergie), données JRC pour les unités PHS de 55 GW/2 TWh



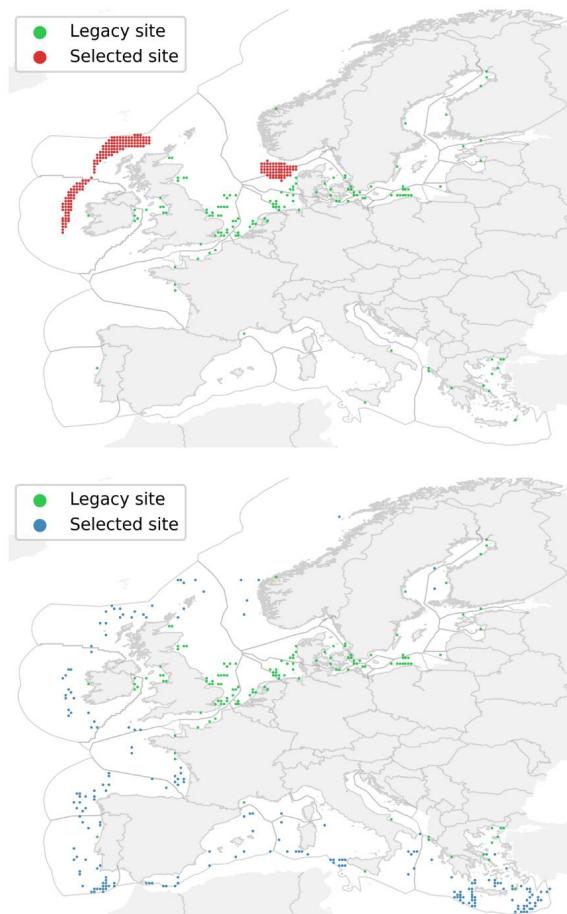
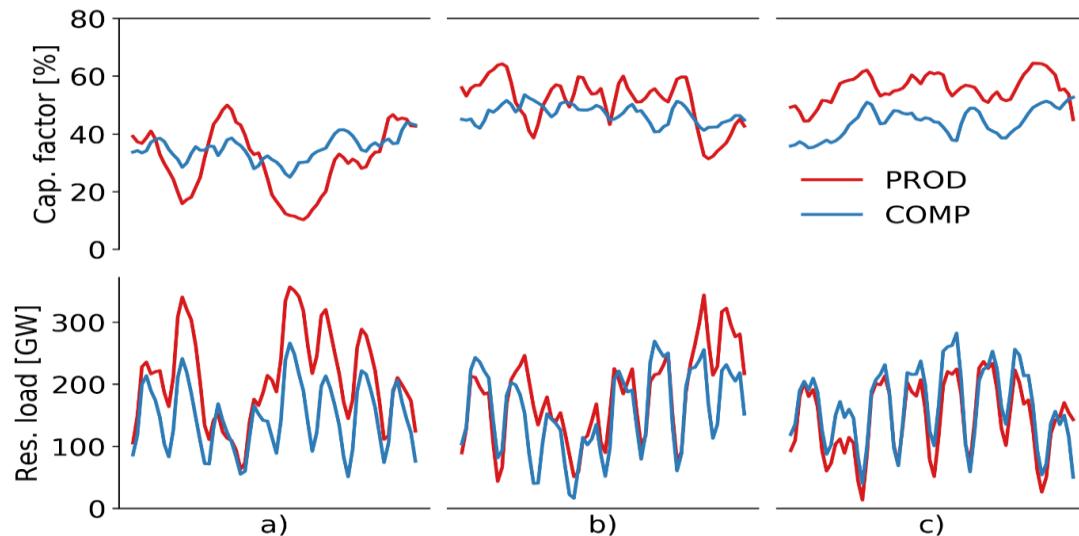
Contraintes politiques :

- 90 % de réduction du budget CO2 à l'échelle de l'UE par rapport aux niveaux de 1990
- un PRM de 20% considéré à chaque nœud à couvrir via dispatchable (OCGT, CCGT, nucléaire, hydraulique), ainsi que les RES (« capacity credit »)

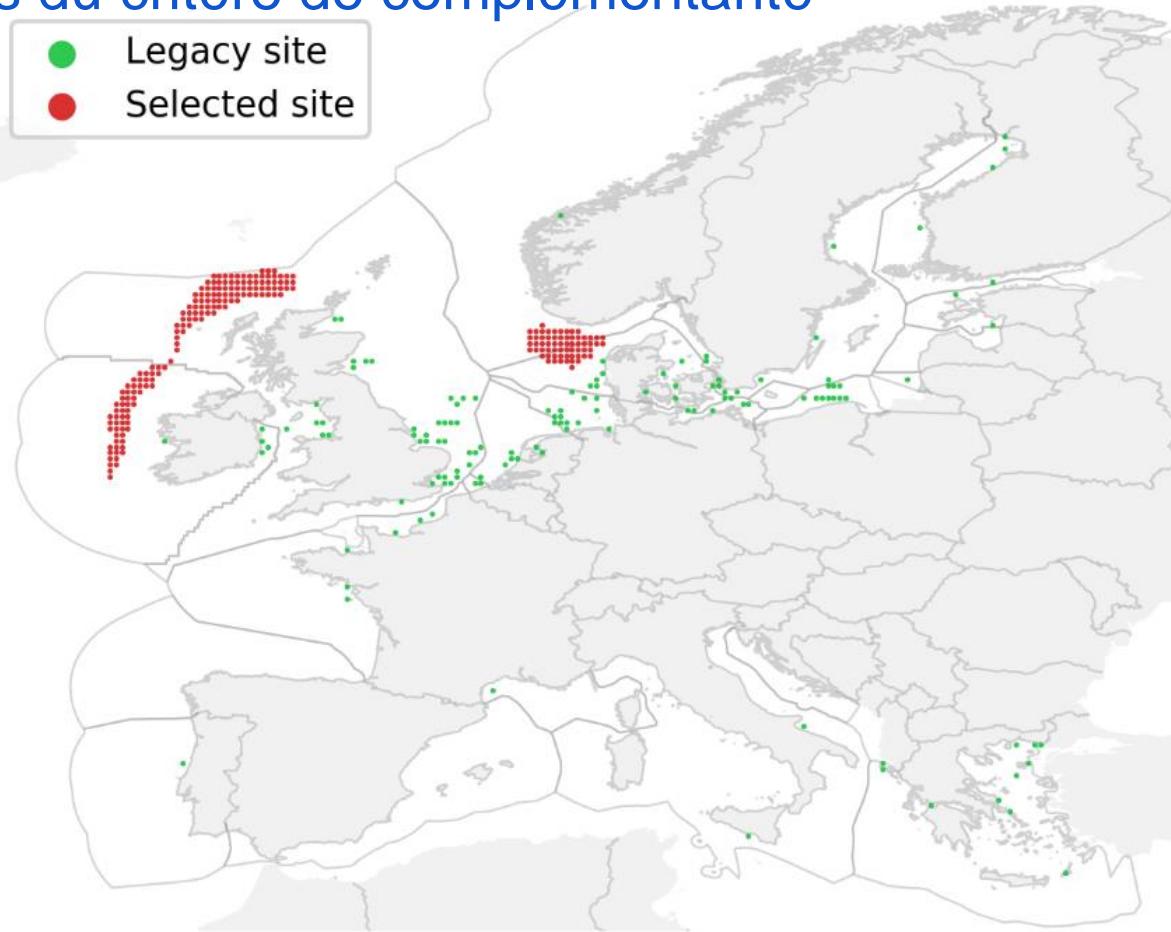
Meth 3. : du choix des localisations au « power systems » : implications du critère de complémentarité

Cas « non-partitionné » : hypothèse d'une Europe unie

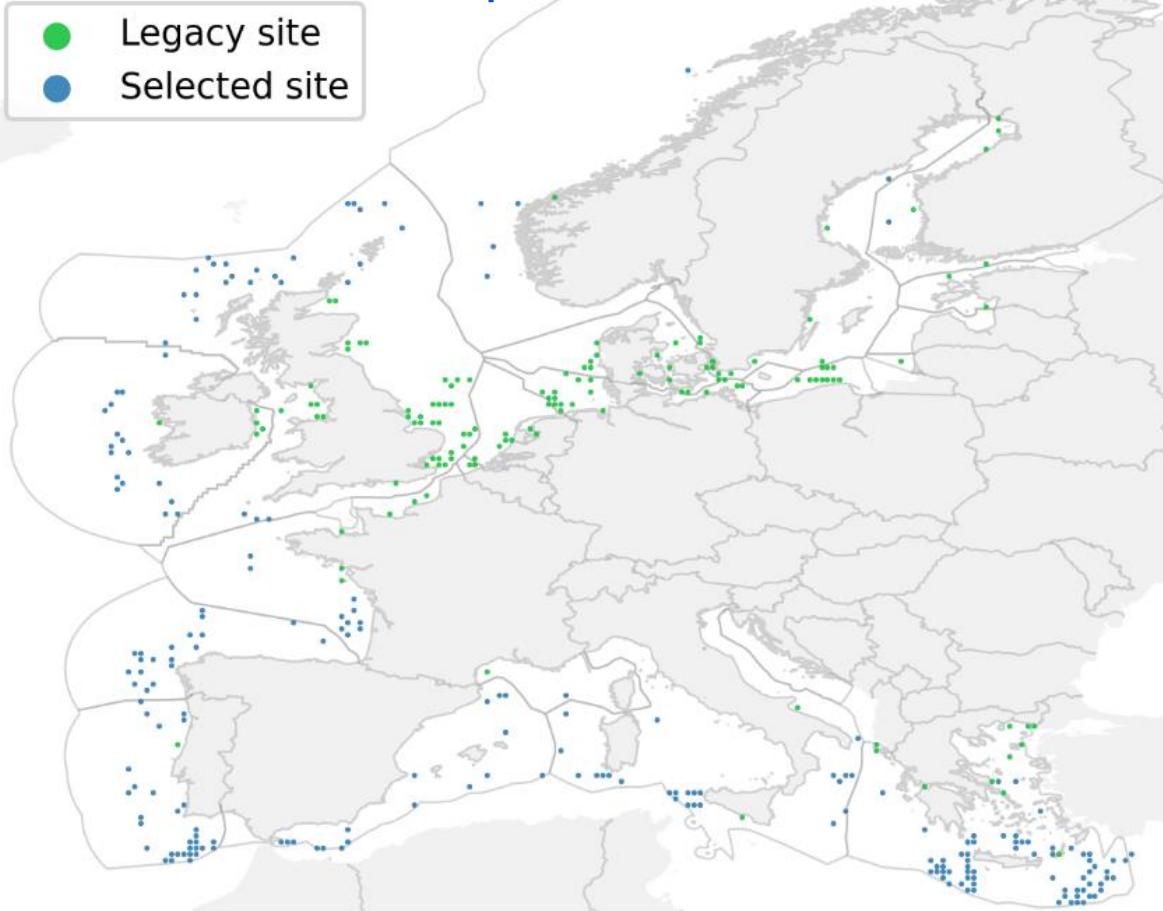
Un compromis complémentarité spation-temporelle vs production : l'optimisation fondée sur la complémentarité
i) atténue les longues périodes de rareté des ressources,
ii) diminue la variabilité à court terme



Meth 3. : du choix des localisations au « power systems » : implications du critère de complémentarité



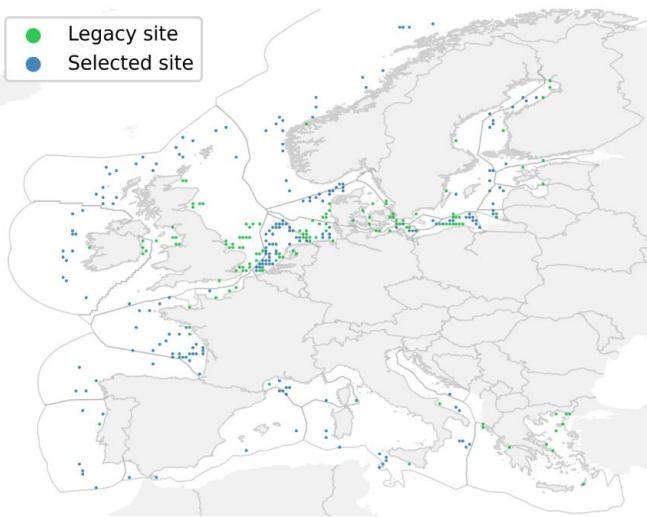
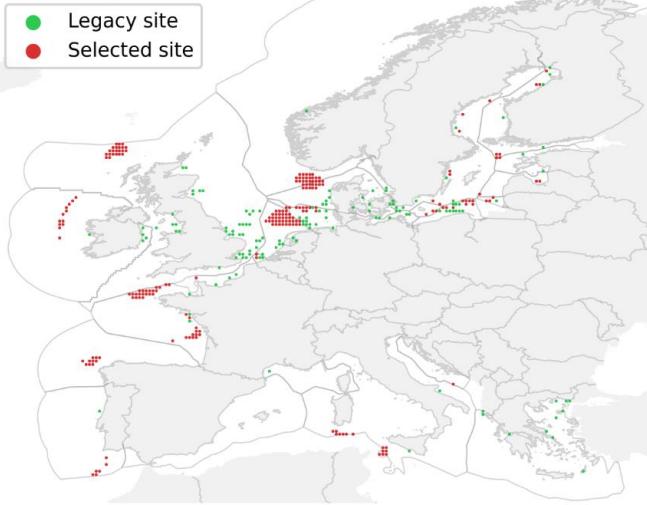
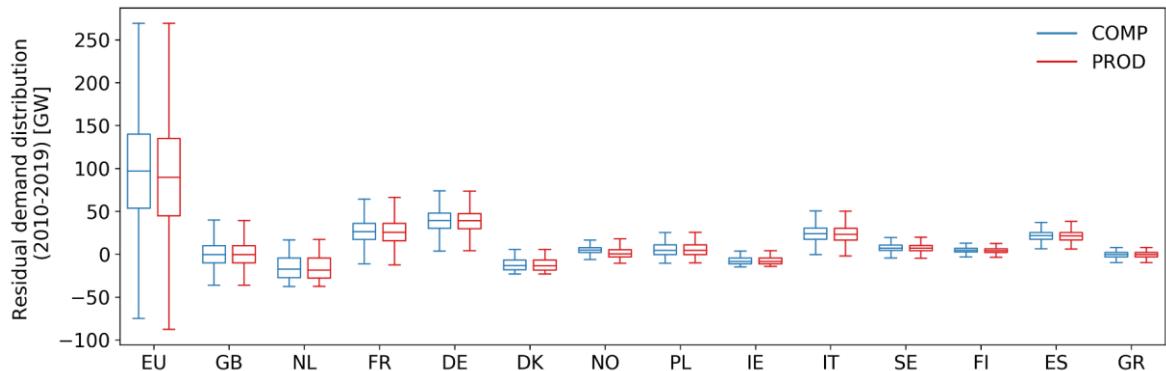
Meth 3. : du choix des localisations au « power systems » : implications du critère de complémentarité



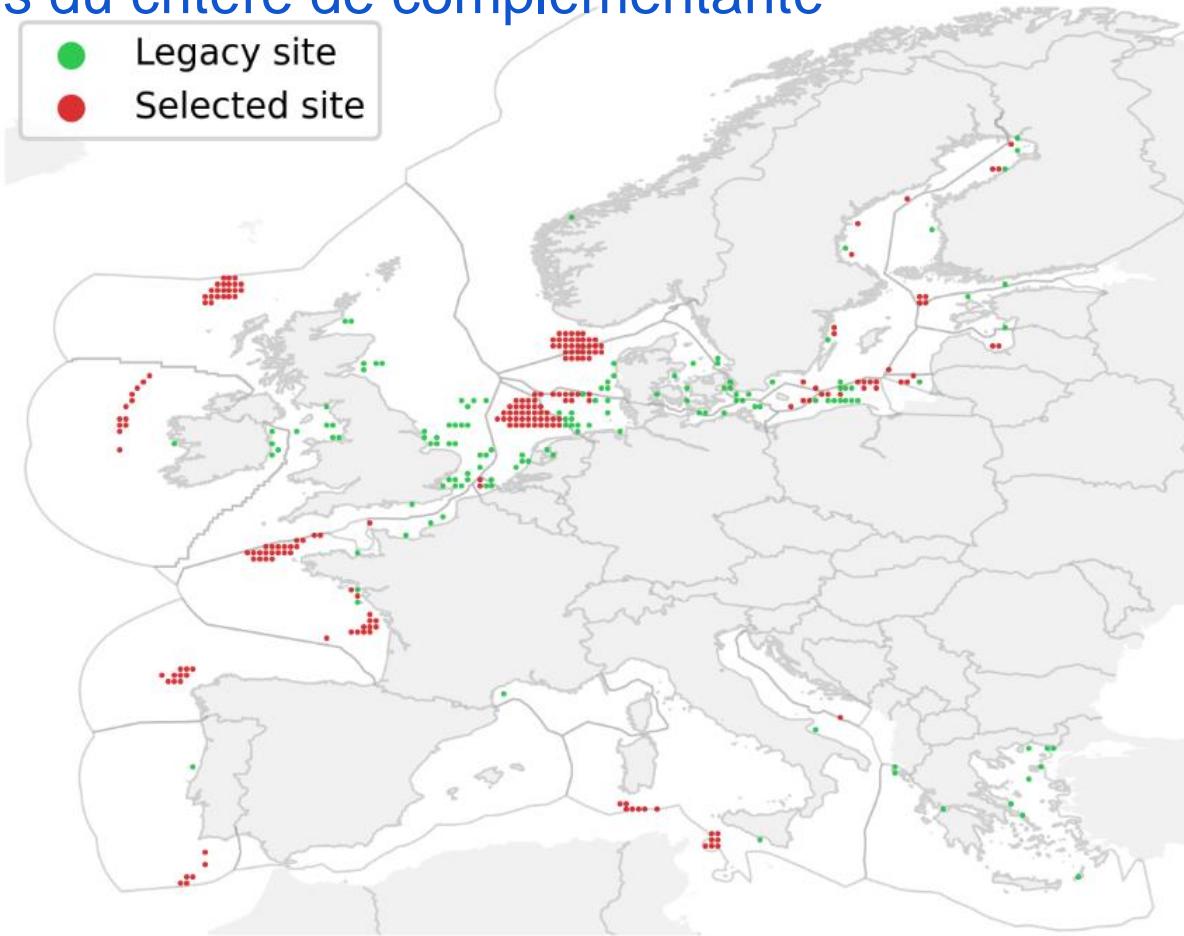
Meth 3. : du choix des localisations au « power » implications du critère de complémentarité

Cas « partitionné » : hypothèse d'une Europe plus divisée

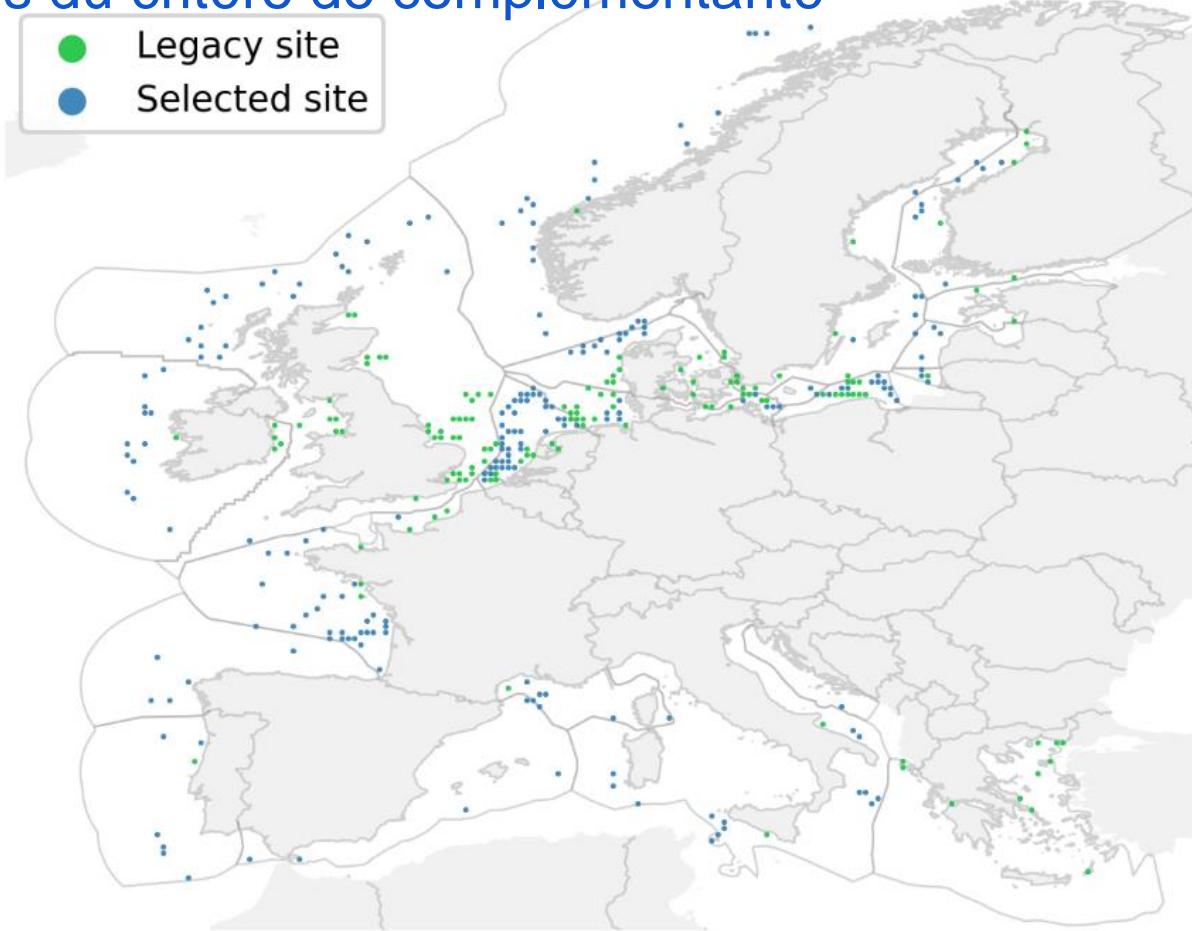
L'introduction des contraintes de partitionnement conduit à des schémas de déploiement engendrant une demande résiduelle assez similaire dans les schémas COMP et PROD. Un résultat qui peut être dû à i) la part des unités préexistantes (communes) ou ii) la ZEE limitée des pays



Meth 3. : du choix des localisations au « power systems » : implications du critère de complémentarité



Meth 3. : du choix des localisations au « power systems » : implications du critère de complémentarité

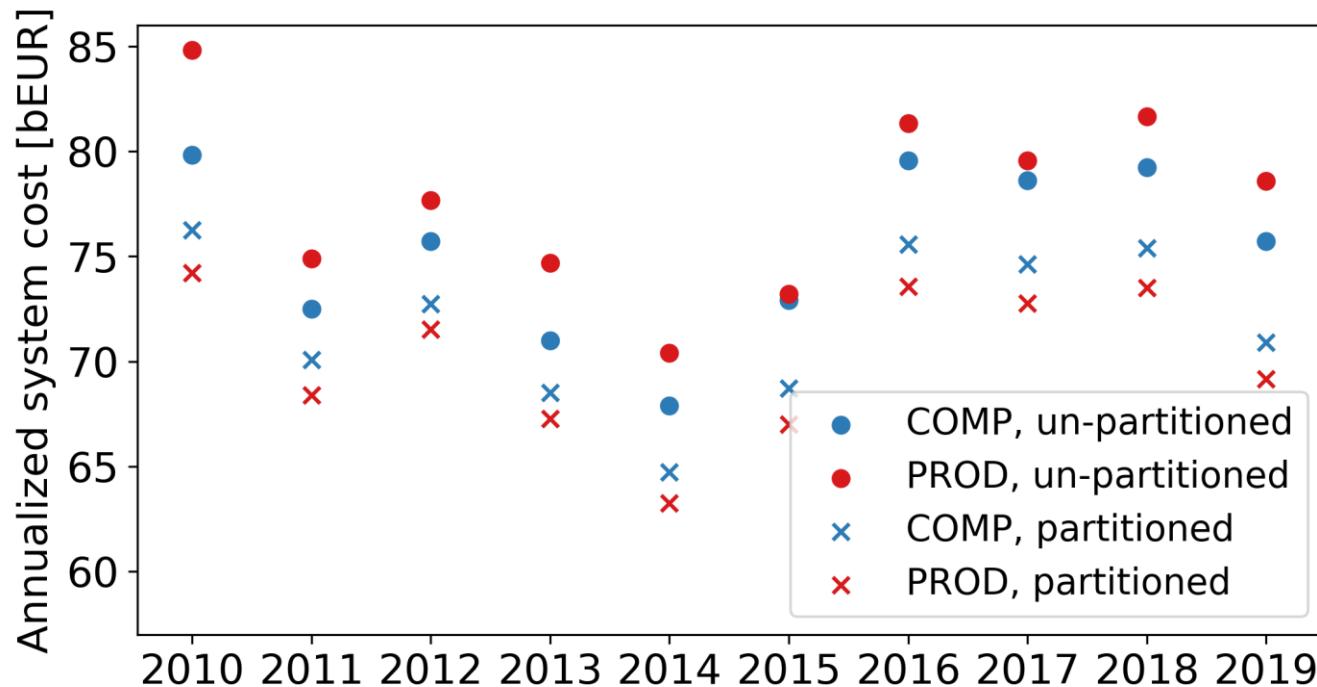


Meth 3. : du choix des localisations au « power systems » : implications du critère de complémentarité

Variabilité annuelle

Les résultats révèlent une variabilité significative d'une année à l'autre.

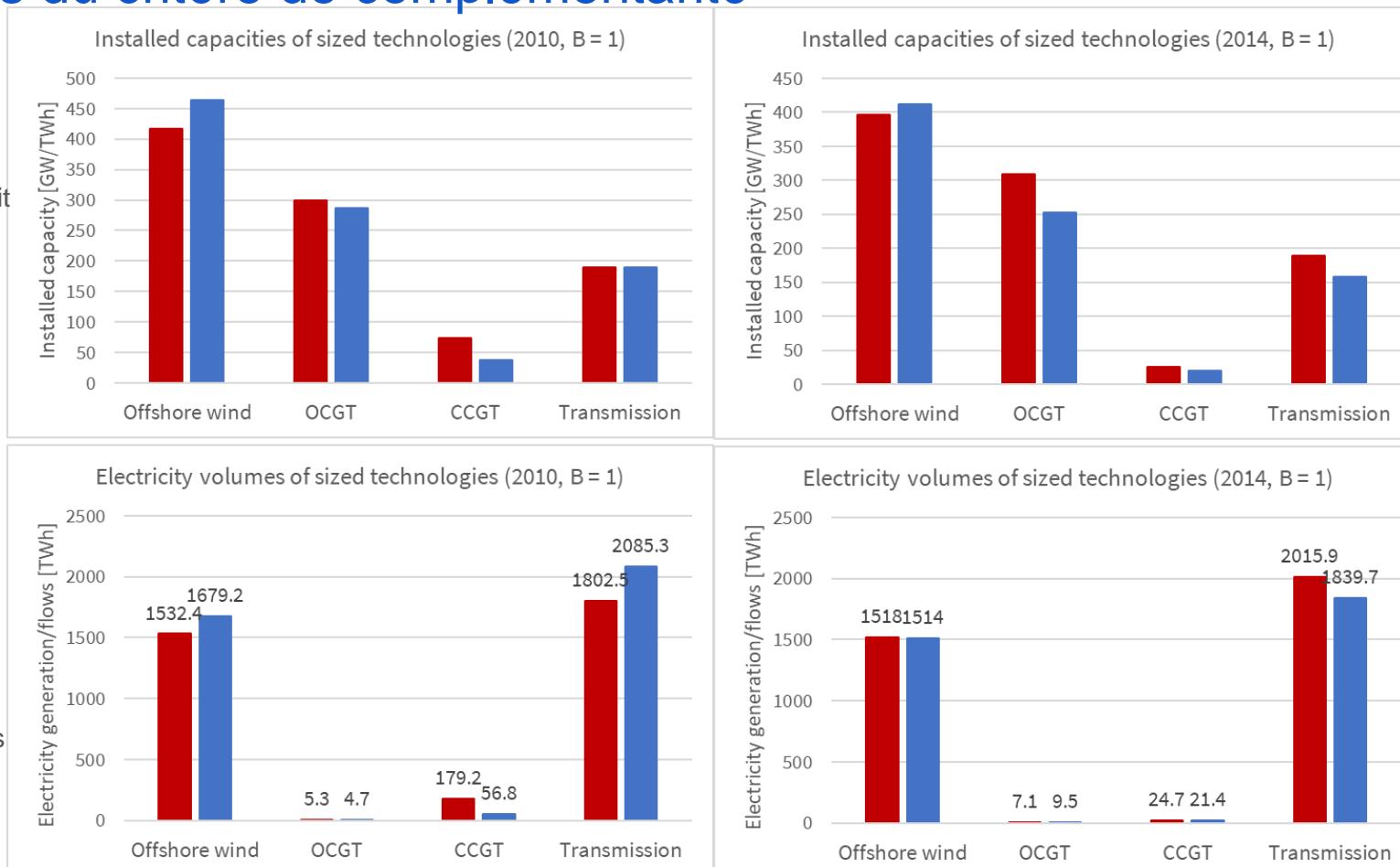
Compte tenu de la complexité d'un problème couvrant l'ensemble des dix années de données, on met en évidence les résultats associés à deux années extrêmes, par exemple 2010 et 2014 (ce qui fait quatre configurations différentes).



Meth 3. : du choix des localisations au « power systems » : implications du critère de complémentarité

Cas d'une Europe unie

Optimiser la complémentarité dans le cas non partitionné conduit à un cout du système jusqu'à 6 % moins cher. COMP déploie plus d'éolien offshore (CF inférieurs) et moins de capacités pilotables (réductions allant jusqu'à 50 %). Le stockage Li-Ion ne joue pas un rôle important en raison des unités PHS préexistantes et de la résolution temporelle assez large. Les capacités de transmissions sont considérablement réduites pour le cas 2014.

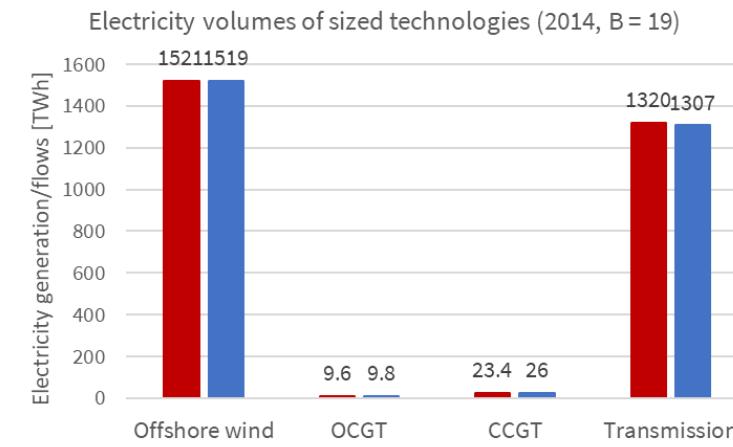
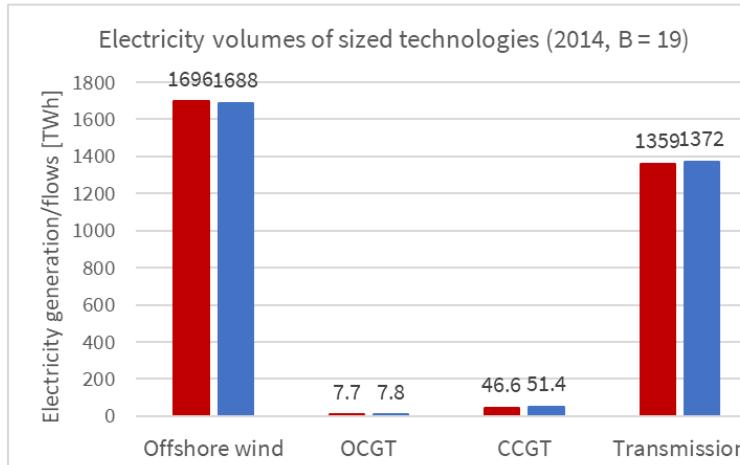
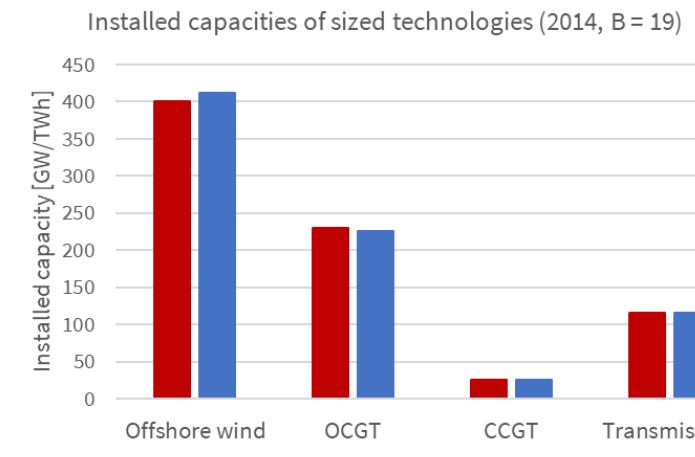
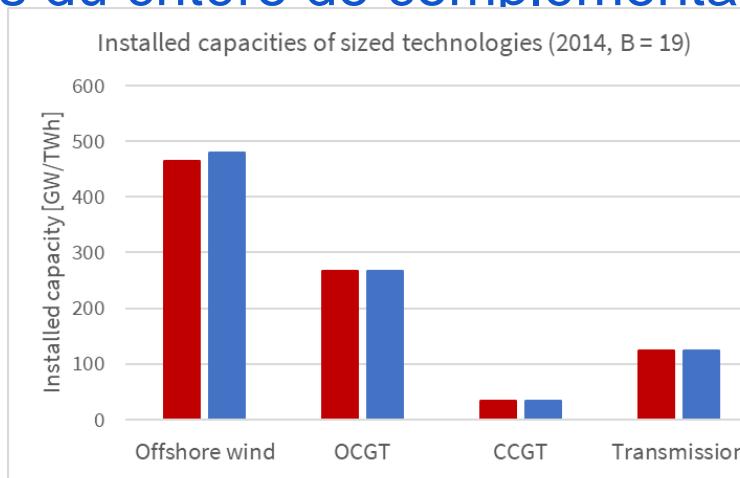


Meth 3. : du choix des localisations au « power systems » : implications du critère de complémentarité

Cas d'une Europe plus divisée

Optimiser la complémentarité COMP dans le cas partitionné conduit à un système jusqu'à 3 % plus cher. Ceci est principalement dû à plus d'éolien offshore requis (plus de CAPEX).

Cependant, des CF plus bas entraînent une génération moindre, compensée par l'usage de capacités pilotables plus chères. Cette fois, optimiser la production exploite la complémentarité inhérente, ainsi la capacité dispatchable est comparable (bien qu'encore plus élevée pour PROD).



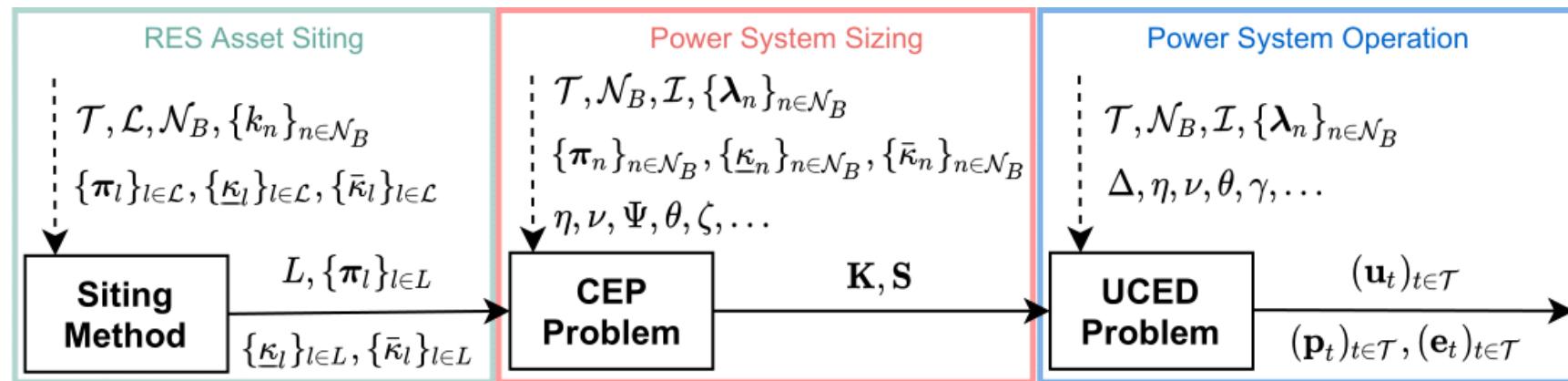
Méthodologie 4.

Optimiser la complémentarité : implications pour les coûts opérationnels des PS

La méthodologie proposée pour cette analyse est similaire à celle présentée précédemment, avec une étape supplémentaire qui exécute un problème de *unit commitment et economic dispatch* à partir des capacités estimée via le CEP et l'optimisation des localisations.

Meth 4. : Optimiser la complémentarité : implications pour les coûts opérationnels des PS

Le problème de *Unit Commitment et Economic Dispatch* minimise le coût d'exploitation du système électrique, tout en prenant mieux en compte (comparativement au CEP) les contraintes techniques d'opération (résolution temporelle plus fine).



Meth 4. : Optimiser la complémentarité : implications pour les coûts opérationnels des PS

$$\begin{aligned}
\min_{(u_t)_{t \in \mathcal{T}}, (p_t)_{t \in \mathcal{T}}, (e_t)_{t \in \mathcal{T}}} \quad & \sum_{t \in \mathcal{T}} \omega_t \left[\sum_{\substack{n \in \mathcal{N}_B \\ g \in \mathcal{G} \cup \mathcal{R}}} \theta_v^g p_{ngt} + \sum_{\substack{n \in \mathcal{N}_B \\ g \in \mathcal{G}}} \theta_{SU}^g u_{ngt}^U + \sum_{\substack{n \in \mathcal{N}_B \\ g \in \mathcal{G}}} \theta_{SD}^g u_{ngt}^D \right. \\
& \left. + \sum_{\substack{n \in \mathcal{N}_B \\ l \in L_n}} \theta_v^l p_{lt} + \sum_{\substack{n \in \mathcal{N}_B \\ s \in \mathcal{S}}} \theta_v^s (p_{nst}^C + p_{nst}^D) + \sum_{i \in \mathcal{I}} \theta_v^i |p_{it}| + \sum_{n \in \mathcal{N}_B} \theta^{ens} p_{nt}^{ens} \right] \\
& p_{lt} \leq \pi_{lt} \kappa_l^*, \quad \forall l \in L_n, \forall n \in \mathcal{N}_B, \forall t \in \mathcal{T}
\end{aligned}$$

$$\sum_{\substack{n \in \mathcal{N}_B \\ l \in L_n}} p_{lt} + \sum_{g \in \mathcal{G} \cup \mathcal{R}} p_{ngt} + \sum_{s \in \mathcal{S}} p_{nst}^D + \sum_{i \in \mathcal{I}_n^+} p_{it} + p_{nt}^{ens} = \lambda_{nt} + \sum_{s \in \mathcal{S}} p_{nst}^C + \sum_{i \in \mathcal{I}_n^-} p_{it}, \quad \forall n \in \mathcal{N}_B, \forall t \in \mathcal{T}$$

$$u_{ngt} \mu_{ngt} \kappa_{ng}^* \leq p_{ngt} \leq u_{ngt} \pi_{ngt} \kappa_{ng}^*, \quad \forall n \in \mathcal{N}_B, \forall g \in \mathcal{G}, \forall t \in \mathcal{T}$$

$$u_{ngt} = u_{ngt-1} + u_{ngt}^{SU} - u_{ngt}^{SD}, \quad \forall n \in \mathcal{N}_B, \forall g \in \mathcal{G}, \forall t \in \mathcal{T}$$

$$p_{ngt} - p_{ng(t-1)} \leq \Delta_g^+ \kappa_{ng}^*, \quad \forall n \in \mathcal{N}_B, \forall g \in \mathcal{G}, \forall t \in \mathcal{T} \setminus \{0\}$$

$$p_{ngt} - p_{ng(t-1)} \geq -\Delta_g^- \kappa_{ng}^*, \quad \forall n \in \mathcal{N}_B, \forall g \in \mathcal{G}, \forall t \in \mathcal{T} \setminus \{0\}$$

$$\sum_{\tau=t}^{t+\delta_g^{mut}} u_{ng\tau} \geq \delta_g^{mut} (u_{ng\tau} - u_{ng(\tau-1)}), \quad \forall n \in \mathcal{N}_B, \forall g \in \mathcal{G}, \forall t \in \mathcal{T}$$

$$\sum_{\tau=t}^{t+\delta_g^{mdt}} (1 - u_{ng\tau}) \geq \delta_g^{mdt} (u_{ng(\tau-1)} - u_{ng\tau}), \quad \forall n \in \mathcal{N}_B, \forall g \in \mathcal{G}, \forall t \in \mathcal{T}$$

$$\begin{aligned}
p_{nst}^D &\leq \kappa_{ns}^*, \quad \forall n \in \mathcal{N}_B, \forall s \in \mathcal{S}, \forall t \in \mathcal{T} \\
p_{nst}^C &\leq \phi_s \kappa_{ns}^*, \quad \forall n \in \mathcal{N}_B, \forall s \in \mathcal{S}, \forall t \in \mathcal{T} \\
e_{nst} &= \eta_s^{SD} e_{ns(t-1)} + \omega_s \eta_s^C p_{nst}^C - \omega_s \frac{1}{\eta_s^D} p_{nst}^D, \quad \forall n \in \mathcal{N}_B, \forall s \in \mathcal{S}, \forall t \in \mathcal{T} \\
\mu_s \sigma_{ns}^* &\leq e_{nst} \leq \sigma_{ns}^*, \quad \forall n \in \mathcal{N}_B, \forall s \in \mathcal{S}, \forall t \in \mathcal{T}
\end{aligned}$$

$$|p_{it}| \leq \kappa_i^*, \quad \forall i \in \mathcal{I}, \forall t \in \mathcal{T}$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}_{ac}} C_{ic} x_i p_{it} = 0, \quad \forall c \in \mathcal{C}, \forall t \in \mathcal{T}$$

Meth 4. : Optimiser la complémentarité : implications pour les coûts opérationnels des PS

Candidate site

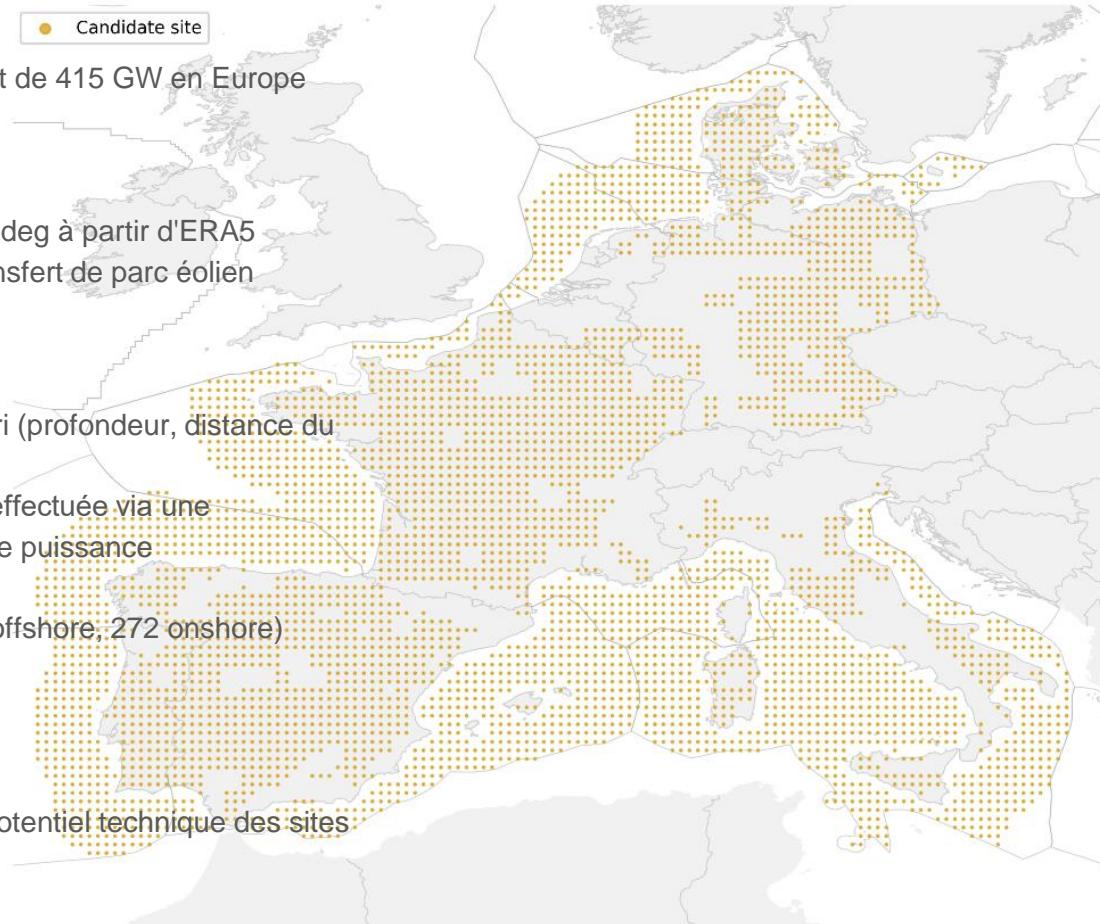
Cette fois, l'étude de cas se concentre sur le développement de 415 GW en Europe continentale, onshore et offshore.

Données :

- dix années (2010-2019), échant. en 3h, résolution de 0,25 deg à partir d'ERA5
- conversion en facteurs de capacité via une fonction de transfert de parc éolien appropriée

Localisations :

- les sites candidats « trop compliqués » sont écartés a priori (profondeur, distance du rivage, densité de population, orographie, foresterie)
- conversion de l'objectif capacité en objectif de cardinalité effectuée via une cartographie nécessitant des informations sur i) la densité de puissance technologique, ii) la surface de référence
- Total d'environ 4 500 sites candidats ; 452 déployés (180 offshore, 272 onshore)
- seuls le cas partitionnés est considéré ici.

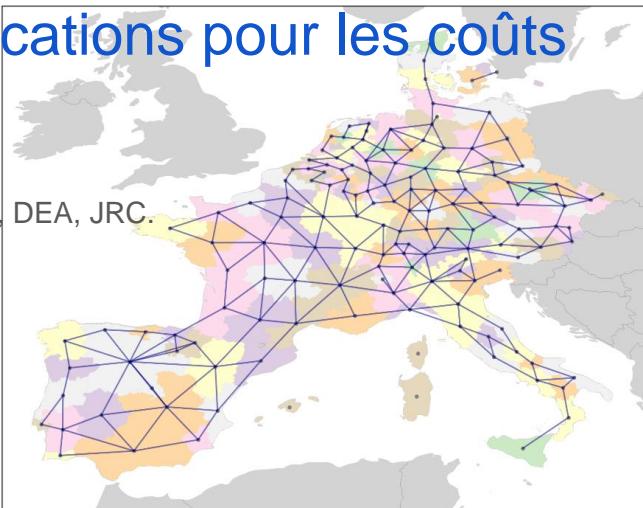


Configuration des paramètres liés à la complémentarité :

δ de période unitaire (1h), α fonction de la demande et du potentiel technique des sites candidats (voir ci-dessous), c/L fixé à 50%

Meth 4. : Optimiser la complémentarité : implications pour les coûts opérationnels des PS

La formalisation du CEP repose principalement sur des données accessibles au public (TYNDP, DEA, JRC). Cependant, la topologie de travail est basée sur les régions administratives NUTS2.

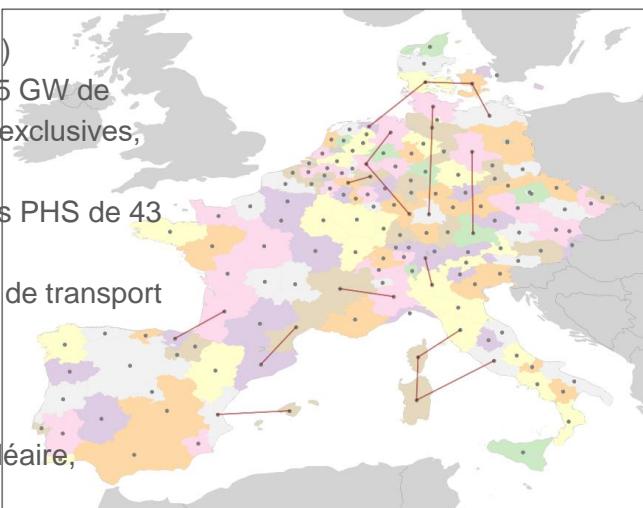


Topologie du réseau et données de demande :

- topologie du réseau basée sur la carte ENTSOE et les régions NUTS
- extension de la transmission limitée au renforcement des corridors existants
- données de demande échantillonnées. à l'heure fournies par l'ENTSOE

Actifs de production et de stockage :

- seuls les actifs éoliens et les unités de gaz sont dimensionnés (également approche greenfield)
- les actifs préexistants (lieux, capacités, etc.) issus i) des ensembles de données du JRC, incl. 45 GW de données nucléaires, 25 GW de RoR, 37 GW d'hydro basée sur des réservoirs et ii) de données exclusives, incl. 34 GW de PV à grande échelle et 69 GW de PV « distribué »
- approche greenfield pour le stockage Li-Ion (puissance et énergie), donnés JRC pour les unités PHS de 43 GW/1,2 TWh à travers le continent
- un modèle DC-OPF est envisagé pour modéliser les flux de puissance dans les infrastructures de transport



Contraintes politiques :

- 90 % de réduction du budget CO2 à l'échelle de l'UE par rapport aux niveaux de 1990
- un PRM de 20% considéré à chaque nœud et à couvrir via i) dispatchable (OCGT, CCGT, nucléaire, hydraulique), ainsi que les RES (via le calcul du crédit de capacité)

Meth 4. : Optimiser la complémentarité : implications pour les coûts opérationnels des PS

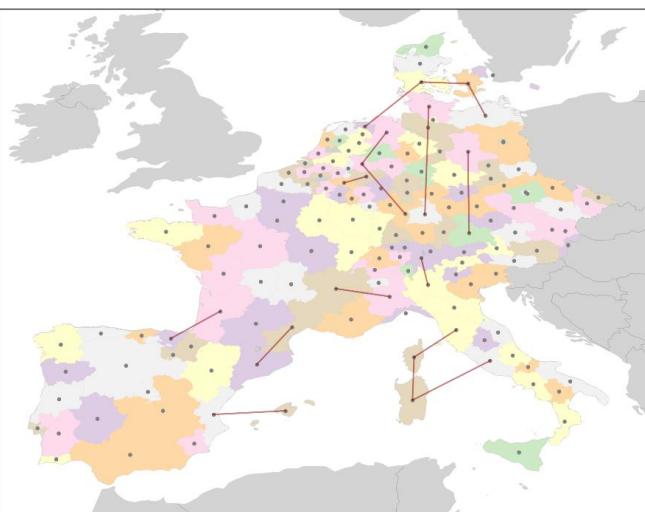
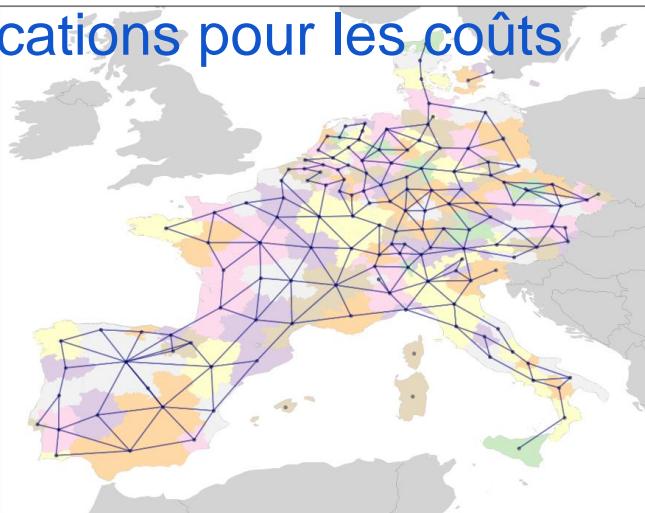
Des choix de modélisation nécessaires pour limiter la complexité du CEP :

Réduction temporelle :

- l'horizon de dix ans dans une configuration à plusieurs nœuds entraîne des problèmes de complexité,
- une approche fondée sur la notion de « journée représentative » a été proposée (réduction de la taille du problème par 50),
- résolution horaire intra-journalière, aucun lien conservé entre les jours (problèmes de stockage potentiels)

Extension du réseau de transmission :

- la réactance-série dans les équations de Kirschoff introduit un couplage bilinéaire : problème contourné en paramétrant la réactance permettant de conserver la linéarité. Le problème est exécuté de manière itérative, la réactance est mise à jour après chaque exécution jusqu'à ce que la différence relative entre les itérations consécutives tombe en dessous de 3%.



Meth 4. : Optimiser la complémentarité : implications pour les coûts opérationnels des PS

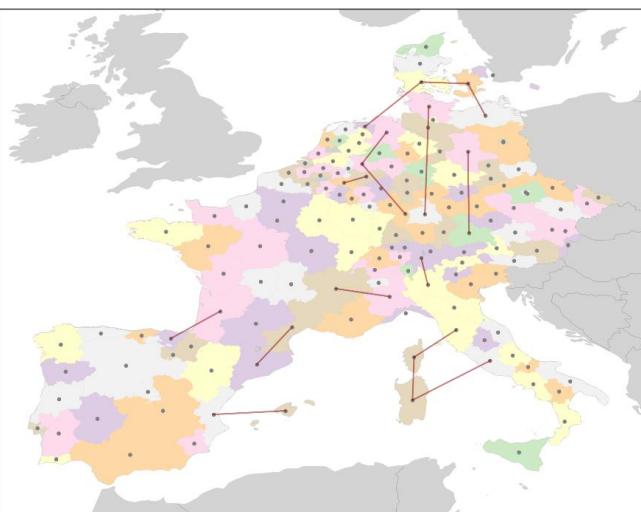
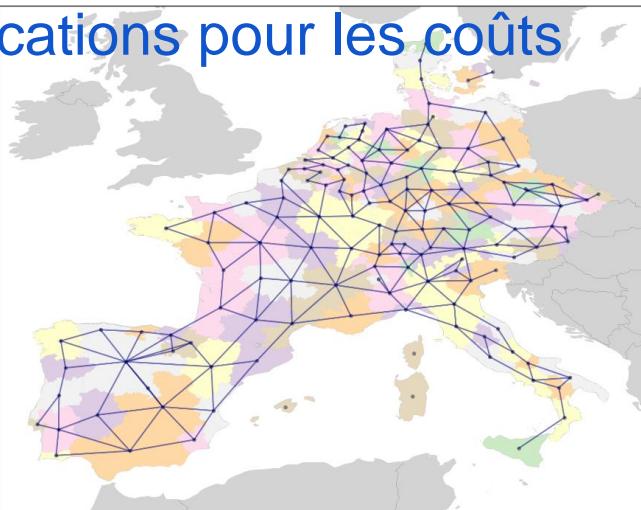
Des choix de modélisation pour limiter la complexité du problème UCDE :

Les technologies de génération avec des contraintes UC modélisées incluent les OCGT, les CCGT et les centrales nucléaires. Les unités sont agrégées par bus.

Aspects pris en compte : coûts de démarrage, contraintes de ramping, les niveaux d'exploitation minimaux, le temps de fonctionnement minimum et le temps d'arrêt minimum.

L'horizon de dix ans est divisé en 3653 blocs quotidiens avec une résolution horaire abordée indépendamment par le solveur.

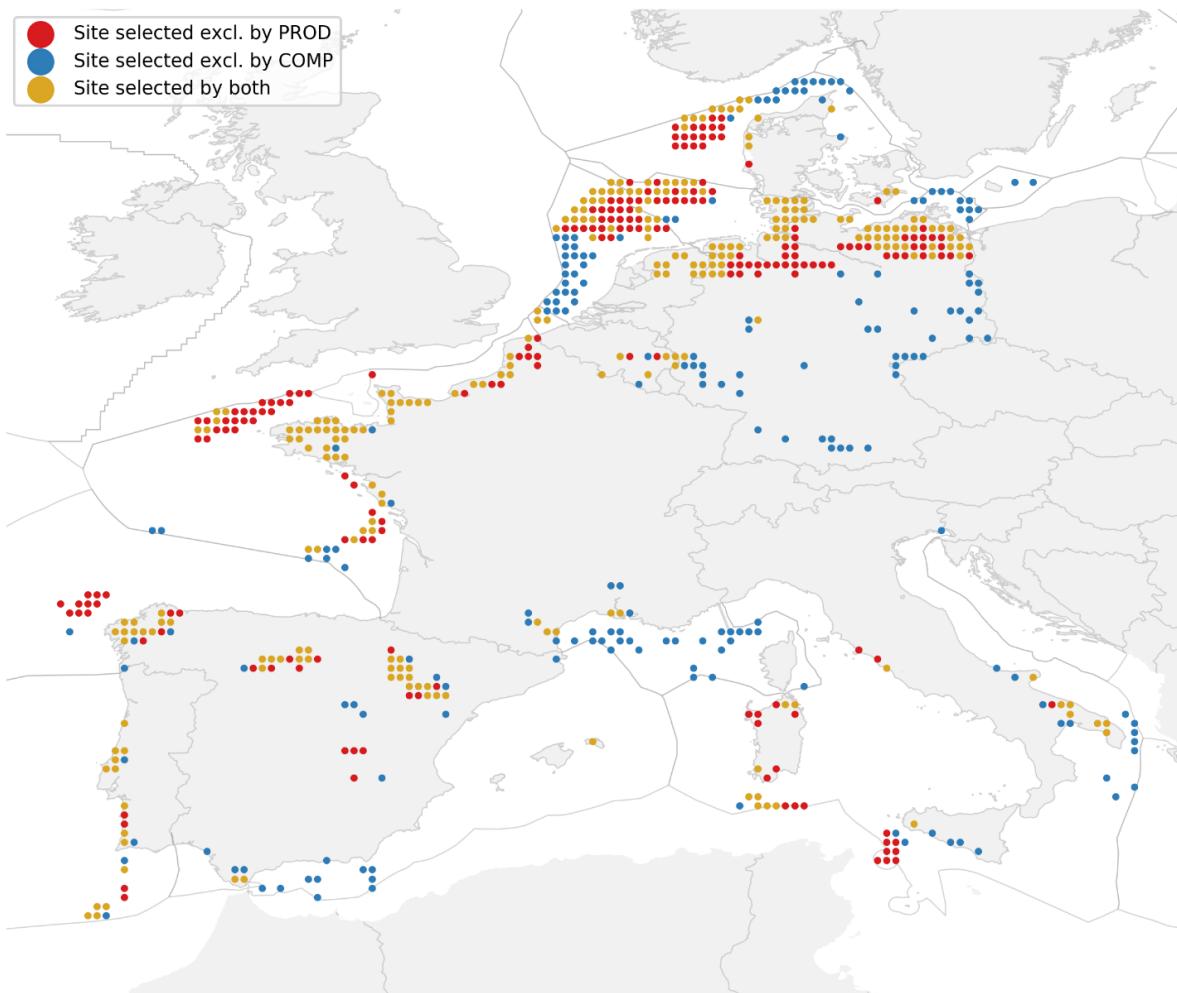
Pas d'horizon glissant (pas de mises à jour des prévisions RES ni de pannes), Prise en compte du couplage inter-journalier des contraintes (par exemple, dernière heure des contraintes jour J-1 - première heure jour J).



Meth 4. : Optimiser la complémentarité : implications pour les coûts opérationnels des PS

Les résultats du choix des localisations révèlent des différences significatives entre les schémas COMP et PRDO dans l'éolien terrestre en DE, mais aussi en FR ou ES.

Les schémas de déploiement offshore sont également différents en FR, ES ou même NL (même si la ressource n'est peut-être pas si différente)

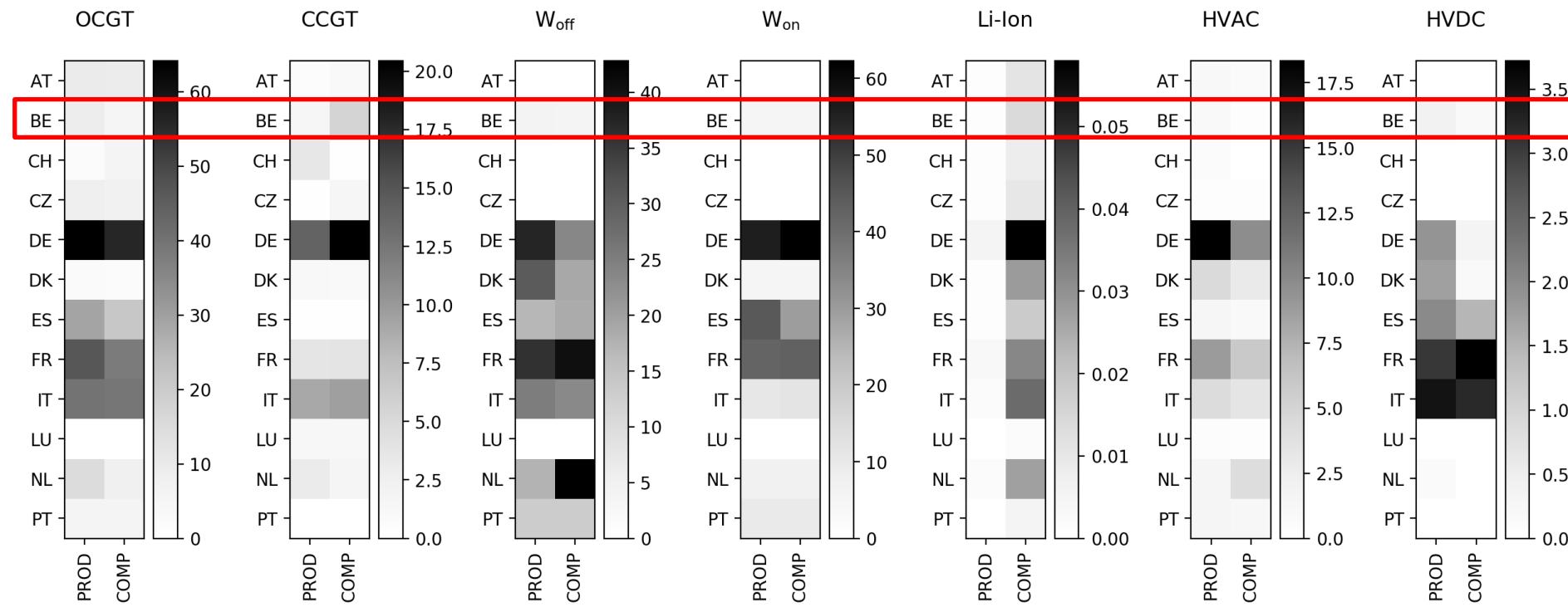


Meth 4. : Optimiser la complémentarité : implications pour les coûts opérationnels des PS

Les différences de capacités installées sont surtout visibles pour la production piloteable.

Les exigences de production de pointe sont réduites dans le cadre du COMP, mais CCGT sollicitées en raison du déficit de prod. éolienne. Les répartitions de capacités diffèrent fortement d'un pays à l'autre.

Des différences significatives sont observées pour les infrastructures éoliennes offshore et pour les capacités de transmission.

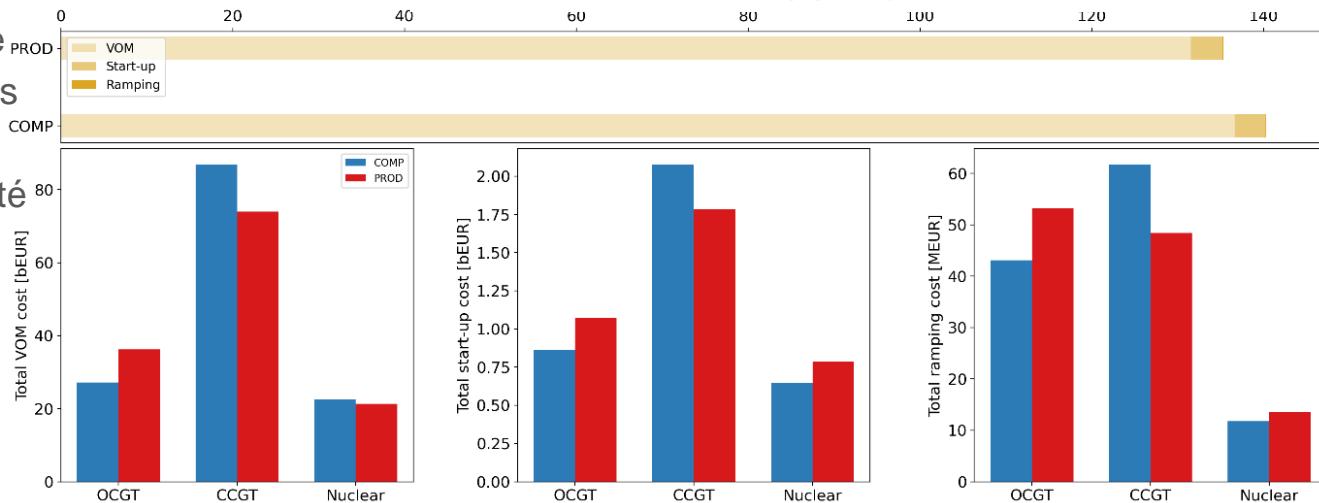
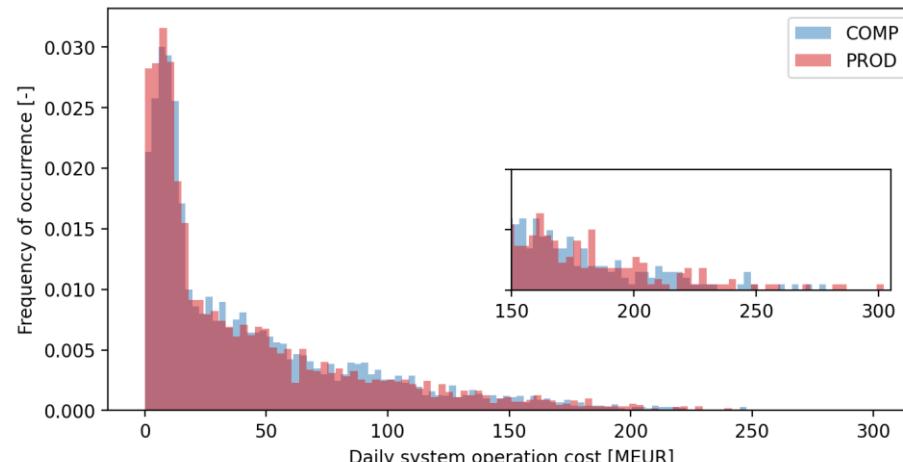


Meth 4. : Optimiser la complémentarité : implications pour les coûts opérationnels des PS

La répartition des coûts quotidiens

d'exploitation du système révèle que PROD conduit à des conceptions globalement 3% moins chères que la configuration basée sur COMP, même si la queue est réduite (moins d'occurrence de journées « très chères »).

La part du lion en termes de coûts d'exploitation est attribuée à la VOM. La différence entre les schémas d'implantation est principalement due à la nécessité d'exploiter des CCGT afin de compenser le déficit d'apport éolien associé au COMP (causé par des CF inférieurs).



Méthodologie 5.

Dépasser la notion d'optimialité pour mieux rejoindre les besoins des décideurs

Une approche pour aborder ce problème de la recherche de solutions qui répondent au besoin des décideurs, quitte à ne plus être optimales en termes de coûts, dans une certaine mesure à spécifier.

Meth 5. : Dépasser la notion d'optimalité pour mieux rejoindre les besoins des décideurs

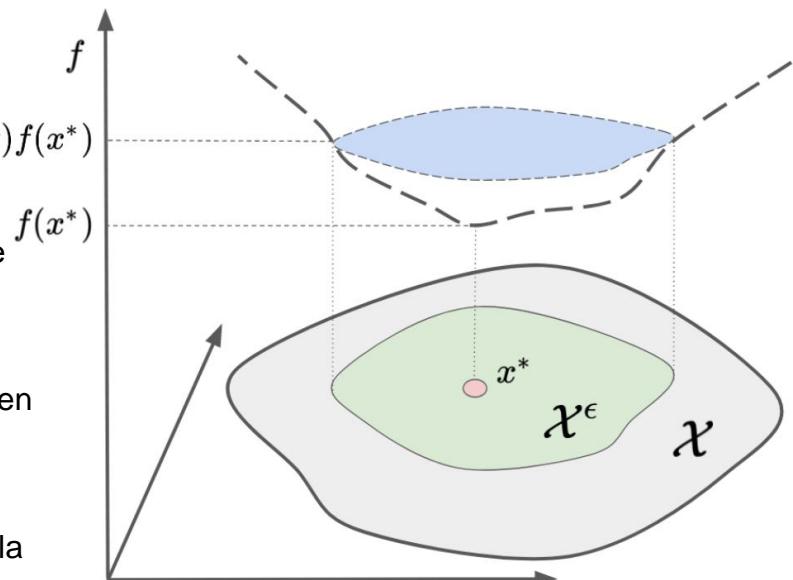
Idée : fournir les conditions nécessaires aux investissements dans les capacités qui limitent la sous-optimalité tout en offrant un ensemble de solutions dans lequel les décideurs peuvent « trouver leur bonheur ».

Exemples :

- Déterminer les investissements minimaux dans les capacités de transmission de chaque pays afin d'assurer qu'on ne s'écarte pas de 10% de la valeur optimale.
- Evaluer si une technologie spécifique fait partie des technologies nécessaires si on souhaite rester « proche » de la solution optimale en termes de coûts

L'approche consiste à rechercher des **conditions nécessaires non-implicites**, qui sont des conditions qui ne peuvent pas être déduite de la connaissance d'autres connaissances nécessaires.

Il s'agit d'une approche générique dont les applications potentielles dépassent le cadre des problèmes d'investissement dans les réseaux électriques.



Meth 5. : Dépasser la notion d'optimalité pour mieux rejoindre les besoins des décideurs

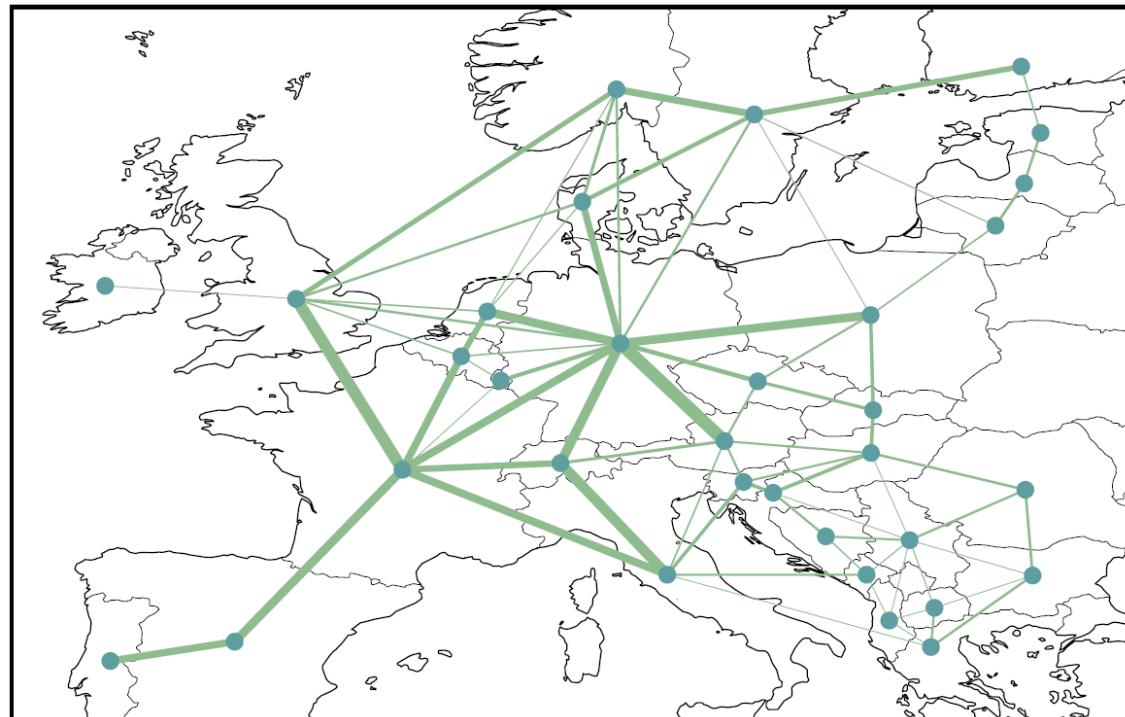
La méthodologie est appliquée au problème de CEP européen tenant compte des objectifs de neutralité carbone fixés par l'Union Européenne à l'horizon 2050. L'objectif est ici de déterminer les investissements à réaliser dans les capacités de transmission, de génération et de stockage afin de répondre à la demande électrique tout en minimisant les coûts d'investissement et les coûts marginaux.

Ce qui est susceptible d'intéresser un décideur:

connaître les capacités minimales à développer pour un ensemble de technologies afin de ne pas trop s'éloigner (selon à seuil à définir) de l'optimalité en termes de coûts.

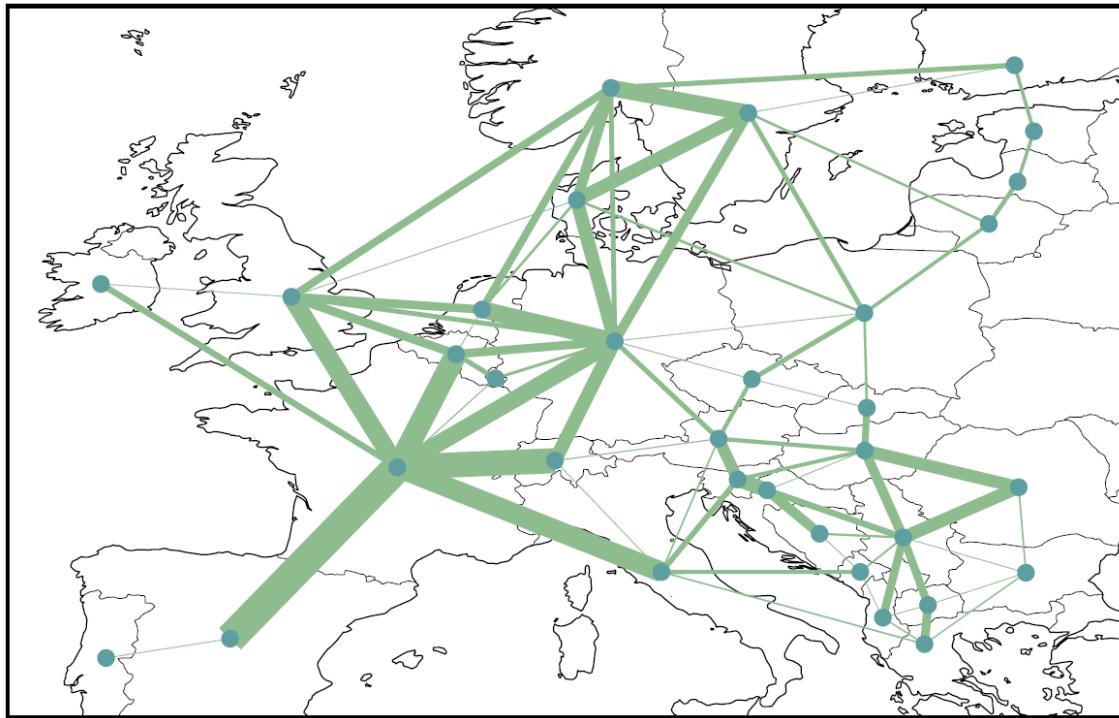
Objectif de réduction de 99% des émissions de CO2 par rapport au niveau des émission de 1990 (objectif fixé à l'échelle européenne).

Coefficient de sous-optimalité entre 0% et 20%



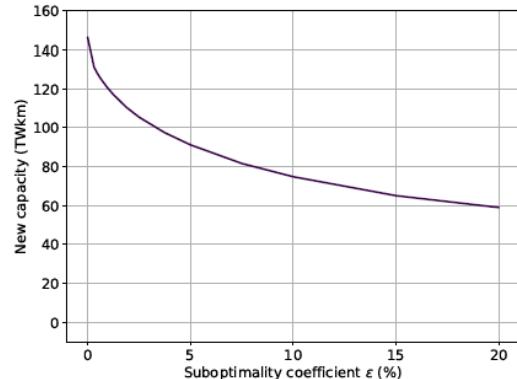
Meth 5. : Dépasser la notion d'optimalité pour mieux rejoindre les besoins des décideurs

Le calcul de la solution optimale est nécessaire.

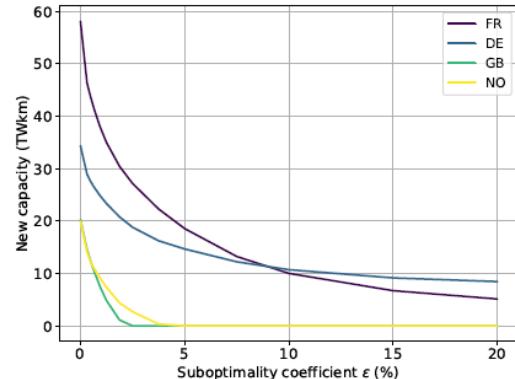


| TWkm | | | GW | | | | | | |
|------|----|-------|--------------|---------------|------------|------|------|--------|--|
| AC | DC | AC+DC | Onshore wind | Offshore wind | Utility PV | CCGT | OCGT | Li-Ion | |
| 128 | 90 | 218 | 168 | 327 | 367 | 49 | 0 | 249 | |

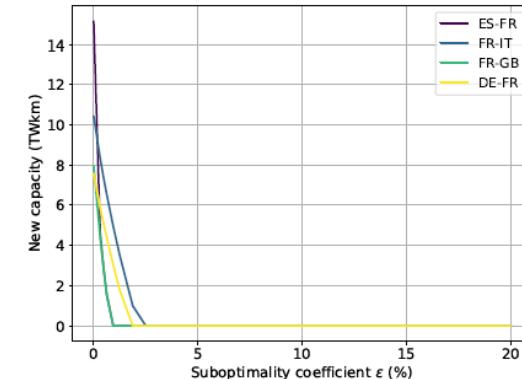
Meth 5. : Dépasser la notion d'optimalité pour mieux rejoindre les besoins des décideurs



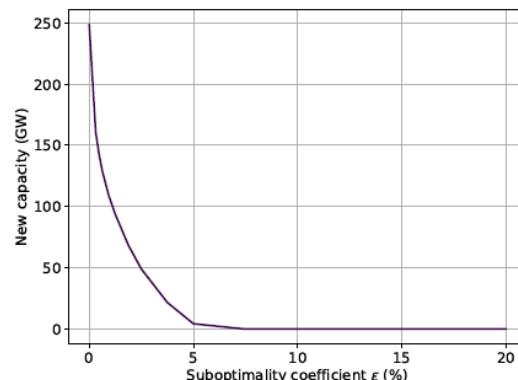
(a) Sum of the capacities of all lines.



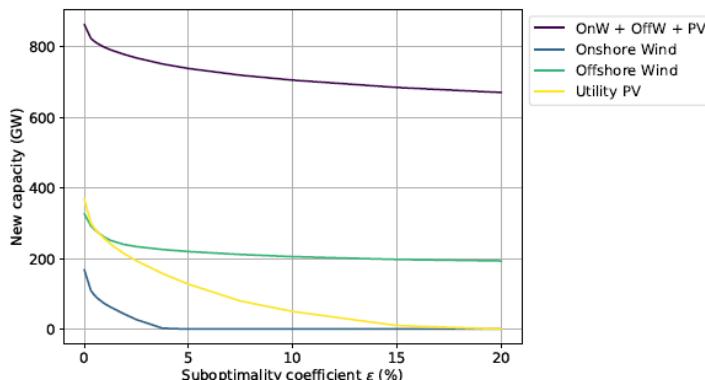
(b) Sum of the capacities of country lines.



(c) Capacity of individual lines.



(d) Sum Li-Ion batteries capacities.

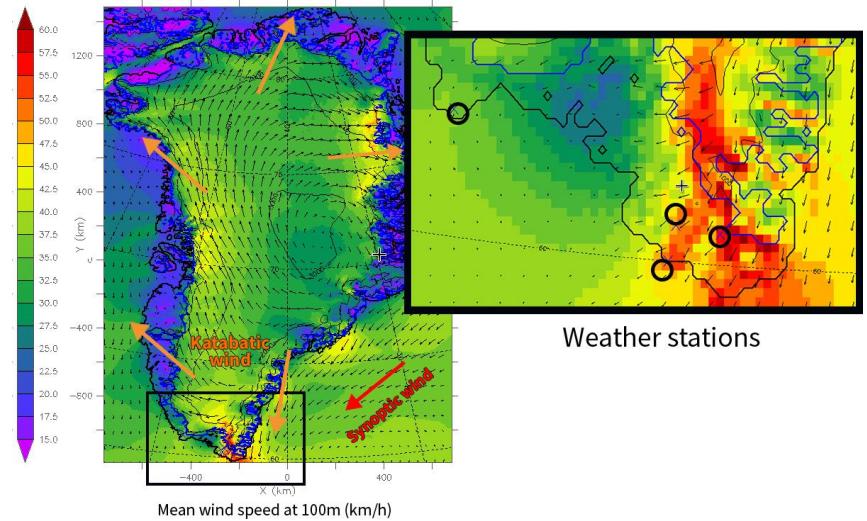


(e) Sum of renewable energy generators capacities (onshore wind, offshore wind, utility PV and sum of the three).

Résultats transversaux et *by-products*

The Katabata Project

Le projet Katabata, mis sur pied par des chercheurs de l'Université de Liège souhaite, pour la première fois, mesurer le potentiel des vents catabatiques du sud du Groeland dans le but de pouvoir y implanter de vastes parc éoliens.



The Katabata Project

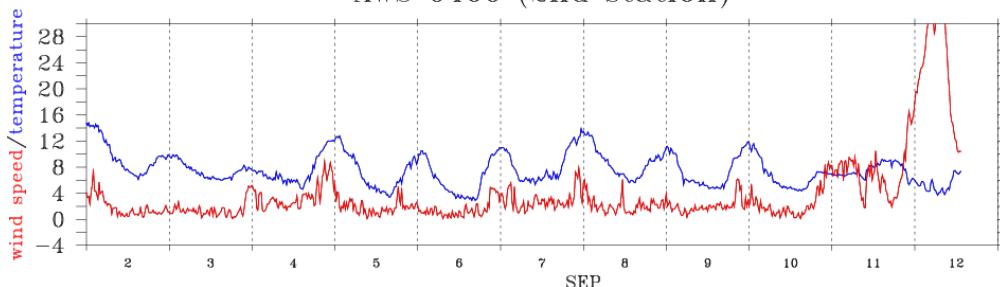
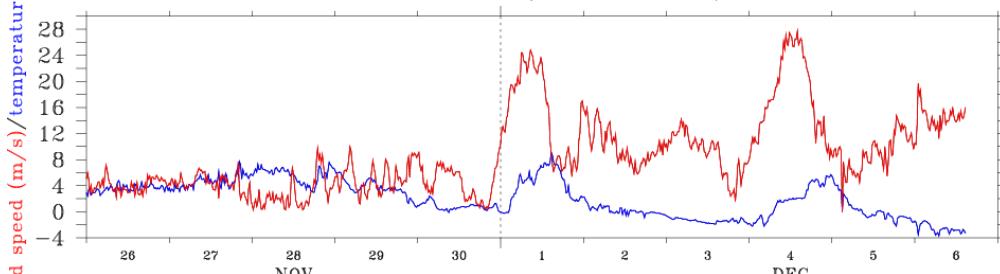
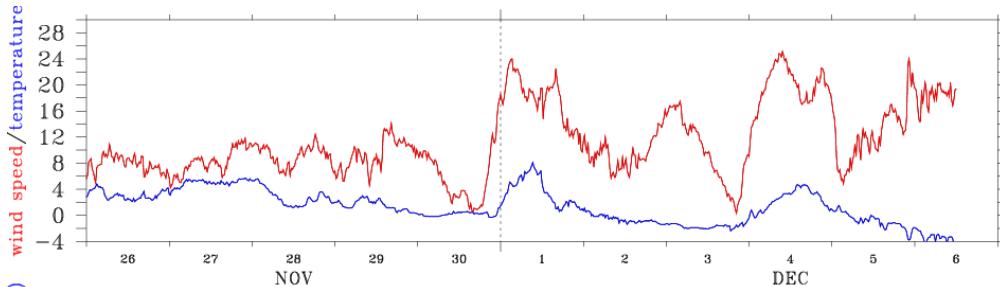
Des résultats attendus (et inattendus !)



Infos

| | | |
|--|----------|--|
| | Dates | Du 4 octobre au 6 décembre |
| | Lieu | Institut de Zoologie Quai Van Beneden, 22 4020 Liège |
| | Durée | Libre |
| | Horaires | Sur réservation |

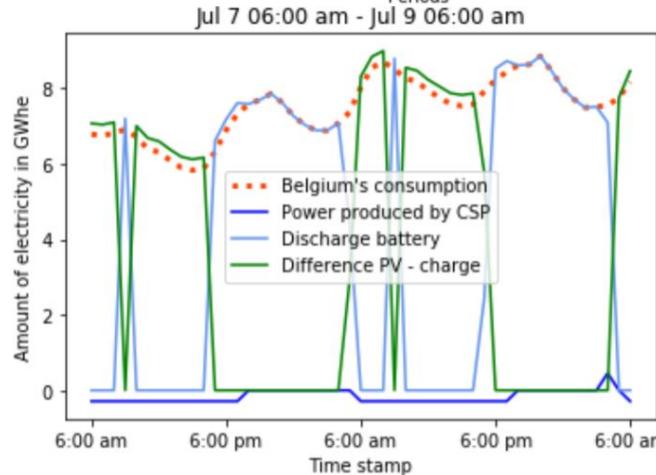
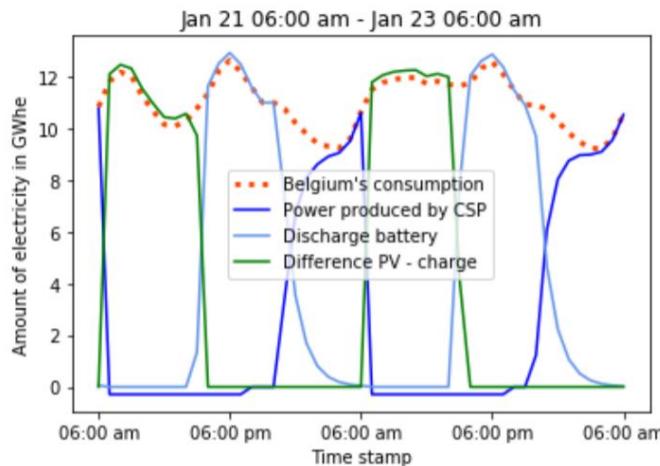
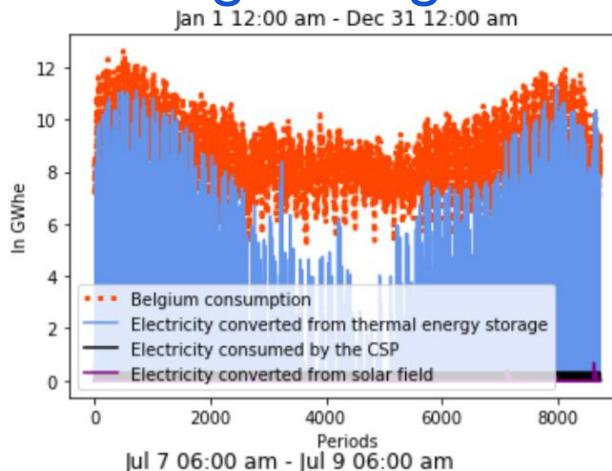
Prix Gratuit



PV vs CSP : Évaluer la complémentarité des technologies CSP, PV et batteries dans un contexte global grid

Une étude visant à déterminer si les centrales solaires à concentration (CSP) avec stockage thermique sont compétitives avec les systèmes PV+batteries dans un contexte global grid.

Un cadre d'optimisation a été développé. Des résultats préliminaires montrent que le CSP peut offrir une complémentarité au solaire PV en termes de coûts.



Tools, data, libraries



Montefiore Energy System Planning

montefesp

Follow

Container of repositories for energy systems models developed within the SmartGrids group at ULiège. Maintained by Antoine Dubois & David Radu

2 followers · 0 following · 0 stars

Overview Repositories 3 Projects Packages

Popular repositories

REplan Public

REplan provides a set of tools to ease the setup and simulation of grid expansion planning.

Jupyter Notebook 1 star

resite Public

Jupyter Notebook

EPIPPy Public

Input preprocessing for Expansion Planning in Python.

Python

0 contributions in the last year

Learn how we count contributions Less More

Beaucoup d'outils et de données utilisées dans le cadre du projet REMI sont libres d'accès :

[montefesp \(Montefiore Energy System Planning\) · GitHub](#)

Articles scientifiques

Assessing the impact of offshore wind siting strategies on the design of the European power system

David Radu, Mathias Berger, Antoine Dubois, Raphaël Fonteneau, Hrvoje Pandžić, Yury Dvorkin, Quentin Louveaux, Damien Ernst

Applied Energy 305, 117700, 2022.

Model Reduction in Capacity Expansion Planning Problems via Renewable Generation Site Selection

D Radu, A Dubois, M Berger, D Ernst

2021 IEEE Madrid PowerTech

Siting renewable power generation assets with combinatorial optimisation

M Berger, D Radu, A Dubois, H Pandžić, Y Dvorkin, Q Louveaux, D Ernst

Optimization Letters, 1-31, 2021.

Critical time windows for renewable resource complementarity assessment

Mathias Berger, David Radu, Raphael Fonteneau, Robin Henry, Mevludin Glavic, Xavier Fettweis, Marc Le Du, Patrick Panciatici, Lucian Balea, Damien Ernst.

Energy, Volume 198, 1 May 2020, 117308, 2020.

Dissémination grand public et vulgarisation



Interconnecter les réseaux continentaux pour approvisionner en continu en électricité d'origine renouvelable. Shutterstock

Email
Twitter
Facebook
LinkedIn
Print

76
934
En dépit des efforts consentis ces deux dernières décennies, 80 % de l'énergie utilisée dans le monde est toujours d'origine fossile (elle provient du pétrole, du charbon et du gaz). La « transition énergétique », ce mouvement dans lequel les sociétés se sont engagées pour décarboner leurs économies, cherche à ce que cette énergie soit essentiellement d'origine renouvelable.

Authors

Damien Ernst
Professor in Energy Systems and Artificial Intelligence, Université de Liège
Raphael Fonteneau
Researcher in Artificial Intelligence and Energy Transition, Université de Liège



HORIZON
The EU Research & Innovation Magazine

Home Views Topics Videos About

INTERVIEW ENERGY ENVIRONMENT

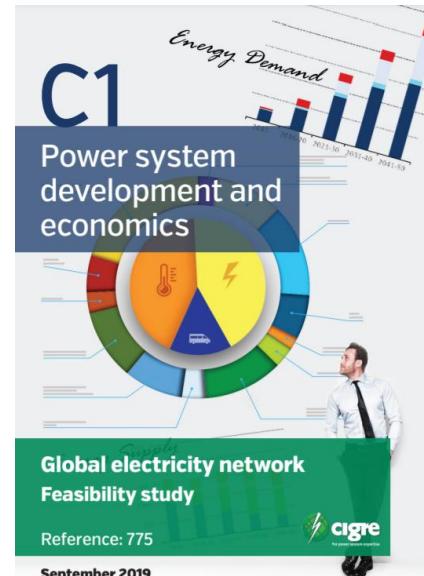
Governments at COP24 should focus on building a global electricity grid – Prof. Damien Ernst

11 December 2018

by Steve Gillman



Prof. Damien Ernst says current emissions-cutting activities are not working and it's time to consider new strategies. Image credit - University of Liège



Energiespecialist Damien Ernst: 'We hoeven helemaal niet minder energie te verbruiken'



Er is wel degelijk een haalbare oplossing voor de klimaatopwarming, zegt energiespecialist Damien Ernst van de Universiteit van Luik: een wereldwijd elektriciteitsnet voor duurzame energie. Daarmee zullen fossiele brandstoffen uit de markt worden geplaatst.



Merci ! Dankjewel !

Fonds de transition énergétique

