

Localisation optimale des capacités de production éoliennes en Europe

version 3.1

Description générale

Dans le contexte de la transition énergétique, on souhaite étudier un scénario où une partie significative de la production d'électricité en Europe serait assurée par de l'énergie éolienne, produite sur des sites *onshore* ou *offshore*. Un inconvénient important de production d'énergie éolienne réside en sa variabilité au cours du temps (celle-ci devant être compensée par le restant du système de production d'électricité), et elle fera l'objet d'une attention particulière au cours de ce projet.

L'objectif de ce projet est d'étudier la faisabilité, au niveau européen, d'un système de production d'électricité fortement basé sur l'énergie éolienne. Il s'agira de déterminer, parmi l'ensemble des sites où cette énergie éolienne peut être potentiellement extraite, à quels endroits et avec quelle capacité il faudrait installer des éoliennes pour obtenir la plus grande production d'énergie possible (on travaille donc à partir de zéro, *from scratch* : on imagine le système idéal en ignorant ce qui existe déjà).



Les critères à prendre en compte dans un premier temps seront les coûts d'installation, qui limitent la puissance maximale installable, et la variabilité de la production. Pour ce dernier critère, des données historiques seront utilisées pour simuler la production sur une année complète. Dans un second temps, on intégrera des caractéristiques supplémentaires au modèle pour le rendre plus réaliste, telles que les échanges entre pays via des interconnexions, la possibilité de stocker de l'électricité, la prise en compte de la pollution par l'émission de CO_2 , etc.

Votre projet comportera deux parties :

- I. Analyse d'un premier modèle européen intégré (deadline 21 avril)
- II. Analyse d'un second modèle plus sophistiqué avec interconnexions et stockage

Chacune des deux parties comptera pour la moitié de la note finale du projet.

Partie I. Analyse d'un modèle européen intégré

Description

Dans cette première partie du projet, on décide d'installer dans toute l'Europe une puissance totale P répartie sur l'ensemble des sites éoliens *onshore* ou *offshore* ; cette puissance totale découle du fait qu'on dispose d'un budget total pour la construction, mais dans ce projet on ignore l'aspect coût en travaillant directement sur la puissance installable. Une proportion κ de la puissance totale doit être exactement attribuée à des sites *offshore*.

Dans cette première partie on ne distingue pas les pays, et on considère la puissance et la production d'énergie totales pour toute l'Europe.

La variabilité moyenne de la production totale d'énergie doit être contrôlée. Plus précisément, on va examiner la production (en MWh) sur chaque période d'une heure au cours de l'année, et on va essayer de *maximiser la production minimale* sur toutes ces périodes d'une heure. En d'autres termes, il s'agit de garantir un certain niveau de production d'énergie durant chaque heure de l'année, et de maximiser ce niveau minimal en choisissant les sites où on installe les éoliennes, et leur puissances.

Question 1A Formulez le problème décrit ci-dessus sous la forme d'un modèle d'optimisation linéaire (en variables continues). Décrivez les variables introduites, la fonction objectif et les contraintes. Estimez la taille du modèle (nombre de variables et de contraintes) en fonction du nombre de sites et d'heures ou de périodes considérées.

Question 1B Résolvez le modèle de la question précédente avec les données fournies, et commentez le résultat obtenu : on peut mentionner par exemple l'énergie totale produite, le rendement moyen, afficher les sites sélectionnés sur une carte et le graphe de la production d'énergie au cours du temps, etc. Commentez également le temps de résolution du *solver* en fonction de la taille du problème.

Question 1C Sans effectuer de résolution supplémentaire, en vous basant sur la théorie et les informations renvoyées par le solver :

- (a) Donnez une formule estimant comment l'énergie maximale produite évoluerait si on modifiait la puissance totale, c'est-à-dire si on remplaçait P par $P + \Delta P$.
- (b) Dans l'hypothèse où on pourrait augmenter la puissance maximale installable sur certains sites (sans modifier leur rendement), déterminez quels sont les dix sites pour lesquels cette amélioration serait la plus rentable en termes de l'objectif considéré (production minimale produite sur une heure). Ces dix sites sont-ils ceux qui bénéficiaient du meilleur rendement moyen sur l'année ?

Question 2A Pour cette question et la suivante, on ajoute la possibilité d'acheter de l'énergie produite par d'autres sources (non éoliennes) durant chaque période de temps. On fixe cependant une certaine limite sur la quantité totale d'énergie pouvant être achetée sur l'année, et on cherche comme ci-dessus à maximiser le niveau minimal d'énergie disponible chaque heure (achats compris).

Décrivez les modifications qu'il faut apporter à votre modèle 1A (variables, contraintes) pour cette nouvelle formulation.

Question 2B En résolvant ce second modèle de façon répétée, représentez graphiquement le compromis qui existe entre énergie horaire minimale disponible (l'objectif) et la quantité totale d'énergie achetée (limitée par contrainte), en faisant varier cette dernière sur une plage raisonnable. Chacune de ces deux quantités correspond à un axe du graphique, et chaque résolution fournira un point.

Enfin, choisissez à l'aide du graphique la quantité d'énergie achetée qui vous semble réaliser le meilleur compromis, et représentez sur un autre graphe la production heure par heure correspondant à ce choix, en distinguant énergie éolienne et énergie achetée. Commentez.

Question 3A Pour ce troisième et dernier modèle, on revient à la situation initiale où la production est uniquement éolienne (sans achat d'énergie). On souhaite à présent contrôler plus strictement la variabilité moyenne de la production. Pour cela, on examine la production d'énergie sur des périodes de T heures consécutives, et on définit la variabilité moyenne comme la valeur moyenne des différences (prises en valeur absolue) de production totale effective entre deux périodes (de T heures) consécutives (en MWh).

On cherche alors à maximiser l'énergie totale qui sera produite par ces installations au cours d'une année tout en maintenant la variabilité moyenne sous une certaine valeur maximale égale à δPT . Le paramètre δ contrôle donc la variabilité moyenne maximale : c'est la fraction de la production maximale PT sur une période de T heures consécutives.

Décrivez les modifications qu'il faut apporter à votre premier modèle 1A (variables, contraintes) pour cette nouvelle formulation.

Question 3B Résolvez ce troisième modèle, et commentez le résultat obtenu comme à la question 1B. Pour conclure, comparez les résultats fournis par les trois modèles.

Conseils

- ◇ Afin d'obtenir des résultats réalistes les données fournies sur un horizon temporel assez détaillé, ce qui entraîne un temps de résolution non négligeable pour le modèle complet. Lors de la mise au point de votre modèle vous pouvez utiliser dans un premier temps un jeu de données restreint, en sélectionnant par exemple uniquement les deux premières semaines de l'année, de façon à accélérer la résolution. Vos résultats finaux seront par contre calculés sur le jeu de données complet.
- ◇ Les modèles 2 et 3 sont totalement indépendants : vous pouvez donc y travailler en parallèle au sein de votre groupe.

Données fournies (pour partie I)

Base de données de 642 sites éoliens (répartis entre les pays), avec leur type (offshore ou onshore) et leur capacité installable maximale (en MW : c'est la puissance maximale qu'on peut y obtenir avec des conditions de vent idéales).

Rendement (sans unité) de la production qu'on peut obtenir sur chaque site, heure par heure pour une année complète ($365 \times 24 = 8760$ heures); ces informations ont été obtenues à partir de simulations de vent, elles mêmes effectuées à partir de modèles calibrés sur des mesures historiques.

Valeurs des paramètres globaux : $P = 500\,000$ MW (puissance à installer), $\kappa = 0.17$ (fraction de la puissance à consacrer à des sites *offshore*), $T = 3$ heures (durée de la période pour la définition de la variabilité) et $\delta = 0.02$ (paramètre sans dimension pour la limite sur la variabilité moyenne).

Ces données sont fournies sous la forme de fichiers CSV, réunis dans une archive zip à télécharger sur Moodle.

Hypothèses (pour partie I)

1. Sur chaque site on peut installer une puissance comprise en zéro et la puissance maximale (toutes les valeurs intermédiaires étant possibles).
2. On considère la production d'énergie heure par heure (sans s'intéresser aux variations à l'intérieur d'une heure).

a production d'énergie sur un site donné durant une heure donnée s'obtient en multipliant la puissance effectivement installée (en MW) par le rendement (sans unité), ce qui donne une puissance. On suppose ensuite que cette puissance est constante durant l'heure en question pour obtenir l'énergie produite (en MWh).

Toute hypothèse supplémentaire utilisée doit être mentionnée et commentée dans le rapport.

Partie II. Analyse d'un modèle avec demandes, stockage hydroélectrique et gaz

Description

Dans la première partie du projet, on a considéré une certaine puissance totale à installer et cherché à produire le plus d'énergie possible, tout en respectant une contrainte de variabilité maximale.

Dans cette seconde partie, on va examiner des modèles plus réalistes qui prendront en compte la demande en énergie électrique, les coûts d'installation et les capacités de stockage hydroélectrique, et la production par centrale au gaz. Les caractéristiques principales sont les suivantes :

Objectif et contraintes

- ◇ On connaît pour chacun des 15 pays européens considérés la consommation d'énergie électrique à chaque heure, et on cherche à produire suffisamment d'énergie pour alimenter ces demandes.
- ◇ L'objectif dans cette partie consiste à **minimiser le coût total de production de l'énergie électrique** sur un certain horizon temporel, idéalement sur une année complète, en décidant de l'installation de capacités de production éoliennes.

On ne cherche donc plus à maximiser la production d'énergie, comme dans la première partie, mais seulement à satisfaire la demande. De plus on n'impose plus dans cette seconde partie les contraintes de la première partie (puissance totale à installer, fraction *offshore*, variabilité maximale, etc.). On repart de zéro en gardant seulement le contexte général et les données (sites, capacités installables, rendements).

Coûts éoliens

- ◇ Le seul coût de production de l'énergie éolienne est celui de l'installation des éoliennes (on néglige donc leur coût de fonctionnement). Ce coût d'installation (différent pour un site offshore ou un site onshore) est proportionnel à la puissance installée. Comme ce coût d'installation sera amorti sur une longue période de temps, on considère aussi que ce coût est proportionnel à la durée de la période étudiée.

Capacités hydroélectriques

- ◇ Certains pays disposent de capacités hydroélectriques. Celles-ci permettent de stocker de l'énergie, sous la forme de l'énergie potentielle de grandes quantités d'eau accumulées dans des bassins. On peut augmenter l'énergie stockée par pompage, à l'aide de l'excédent d'énergie électrique produite par les éoliennes et les centrales, et ce jusqu'à une certaine capacité maximale par pays (dépendant de la taille des bassins disponibles). On peut également consommer l'énergie stockée par turbinage, ce qui produit à nouveau de l'énergie électrique, mais cette opération est affectée par un rendement (on ne récupère pas entièrement tout l'énergie stockée). Enfin, certaines ressources hydroélectriques sont naturellement alimentées par des cours d'eau : on dispose du relevé historique de ces apports pour chaque pays durant chaque heure.

Ces opérations de pompage/turbinage font partie des décisions à optimiser durant chaque période de l'horizon temporel considéré. On ne prend en compte aucun coût lié à ces capacités hydroélectriques (installations déjà existantes, et coût d'utilisation supposé négligeable).

Centrales au gaz et coûts

- ◇ Pour faire face à des périodes de temps où les productions éolienne et hydroélectrique seraient insuffisantes, on peut également envisager d'installer des centrales au gaz, également avec un coût d'installation proportionnel à la puissance installée. Ces centrales peuvent être utilisées si nécessaire durant chaque période de temps. A la différence des éoliennes, l'utilisation d'une

centrale au gaz entraîne également un coût de fonctionnement (principalement pour le combustible), proportionnel à l'énergie produite. La puissance totale à installer pour ces centrales est une décision à optimiser, de même que la quantité d'énergie qu'elles produisent durant chaque période de l'horizon temporel considéré.

Pour cette seconde partie, on considère à nouveau l'Europe dans son ensemble, en agrégeant donc les données par pays (production, stockage et consommation) pour former une seule entité.¹ Comme dans la première partie, on travaillera du point de vue temporel par périodes de $T = 3$ heures.

Question 4A On considère d'abord un modèle européen agrégé avec installation d'éoliennes et utilisation des capacités hydroélectriques, mais pas de centrales au gaz. Ce modèle agrégé ne possède donc qu'une seule entité pour la production, le stockage et la consommation d'électricité (additionnez les capacités hydroélectriques et les demandes de tous les pays qui la composent).

On cherche à calculer la valeur minimale du prix moyen de l'électricité consommée.

Formulez ce problème sous la forme d'un modèle d'optimisation linéaire (en variables continues). Décrivez les variables introduites, la fonction objectif et les contraintes.

Question 4B Résolvez le modèle de la question précédente avec les données fournies, et commentez le résultat obtenu. Commentez également le temps de résolution.

Question 4C Via une analyse post-optimale (sans résolution supplémentaire), estimez

- ◇ combien rapporterait l'installation d'un MWh supplémentaire de stockage
- ◇ combien rapporterait l'installation d'un MW supplémentaire de pompage
- ◇ combien rapporterait l'installation d'un MW supplémentaire de turbinage

(on utilisera un raisonnement valable pour des petites variations).

Question 5 Considérez à nouveau le modèle de la **question 4** avec la contrainte supplémentaire suivante : sur chaque site éolien potentiel, il faut choisir entre installer 100%, 50% ou 0% de la capacité maximale installable. Pour ce modèle uniquement, vous pouvez utiliser d'autres variables que des variables continues. Décrivez comment votre modèle doit être adapté.

Quel est l'effet de cette nouvelle contrainte sur le prix moyen ? Que devient le temps de résolution ? Commentez.

Question 6 Revenez au modèle initial de la **question 4** et incorporez la possibilité d'installer et d'utiliser des centrales au gaz. Décrivez les modifications à apporter à votre modèle.

Quel est l'effet de cette nouvelle possibilité de production sur le prix moyen ? Que devient le temps de résolution ? Commentez.

1. Un modèle plus réaliste considérerait les quinze pays séparément, avec pour chaque pays sa demande, sa production propre éolienne ou au gaz, et ses capacités hydroélectriques, et prendrait également en compte la notion d'interconnexion entre certains pays via des liaisons à haute tension, qui permettent d'échanger de l'énergie à tout moment mais avec une puissance limitée. On ne traitera cependant pas ce cas plus complexe dans ce projet.

Remarques

Tentez d'abord de résoudre vos modèles sur un petit horizon temporel (par exemple sur une semaine) puis augmentez progressivement la durée (par exemple en considérant successivement deux semaines, un mois, trois mois, six mois, un an). Pour certaines questions, il pourrait être très lent de résoudre le modèle sur un horizon d'une année entière ; votre objectif est alors d'identifier le plus grand modèle soluble en un temps raisonnable (par exemple en une demi-heure ou une heure de calculs).

Pour les modèles de cette seconde partie, plus complexes que ceux de la première partie, il est recommandé d'utiliser un langage de modélisation pour faciliter la formulation des problèmes linéaires. Nous recommandons le package CVXPY : <https://www.cvxpy.org/>.

Données fournies (pour partie II)

Consommation d'énergie électrique de chaque pays heure par heure, pour une année complète.

Coût d'installation (amorti) d'une éolienne offshore, d'une éolienne onshore et d'une centrale au gaz, exprimés en euros par MW et par an.

Coût d'utilisation d'une centrale au gaz, exprimé en euros par MWh.

Capacité de stockage hydroélectrique (en MWh) et puissances maximales de pompage et de turbinage (en MW) dans chaque pays. Rendement pour le turbinage. Relevé des apports hydroélectriques par pays et par heure, pour une année complète.

Toutes les données nécessaires au projet seront fournies sous la forme de fichiers textes, réunis dans une archive zip à télécharger sur Moodle.

Hypothèses (pour partie II)

1. Durant chaque période de T heures consécutives, la production électrique totale doit être supérieure ou égale à la consommation. Il n'est pas demandé d'équilibrer production et consommation : on suppose qu'il est possible d'ignorer ou de se débarrasser de l'énergie excédentaire éventuellement produite (ce qui n'est pas du tout vrai dans la réalité).
2. On ne se préoccupe pas des détails de l'évolution heure par heure à l'intérieur d'une période donnée. Ainsi, on considérera pour une période donnée la demande totale pour les 3 heures (somme des demandes individuelles par heure). On ignore donc ce qui se passe à l'intérieur de la période des 3 heures tant que le bilan à la fin des 3 heures est correct.
3. La production des centrales au gaz est totalement ajustable durant chaque période de temps (entre une production nulle et une production correspondant à la puissance installée).
4. La quantité d'énergie stockée dans les installations hydroélectrique de chaque pays au début de la plage de temps analysée est égale à 50% de la capacité totale de stockage. De plus, à la fin de la plage de temps analysée il est nécessaire de ramener cette quantité d'énergie stockée à la même valeur (afin d'obtenir un bilan nul pour le stockage).
5. Le stockage d'énergie hydroélectrique (sous forme d'eau dans des bassins) et le pompage (stockage de l'énergie électrique produite non consommée) sont supposés sans pertes. Par contre, le turbinage (production d'électricité à partir de ce stockage) s'effectue avec un rendement $\eta < 1$ (fraction de l'énergie stockée qui est réellement récupérée).

Toute hypothèse supplémentaire utilisée doit être mentionnée et commentée dans le rapport.