

**CENTRALE
LYON**

Compte Rendu 2

Combien d'éoliennes (et de quelles dimensions) faut-il
pour alimenter la France en électricité ?

Élèves :

Jeanne AUDIGIER
Pierre-Louis CAMARET
Léo YOUSSEFI

Enseignants :

G. CHEVEREAU
B. BERNARD

13 mars 2025

Table des matières

1	Introduction	2
2	Diagramme de Raisonnement	2
3	Détail des Calculs et Hypothèses	4
3.1	Consommation de la France	4
3.2	Production électrique d'une éolienne	5
3.3	Résultat final	6
4	Analyse et Limites	6
5	Conclusion	7

1 Introduction

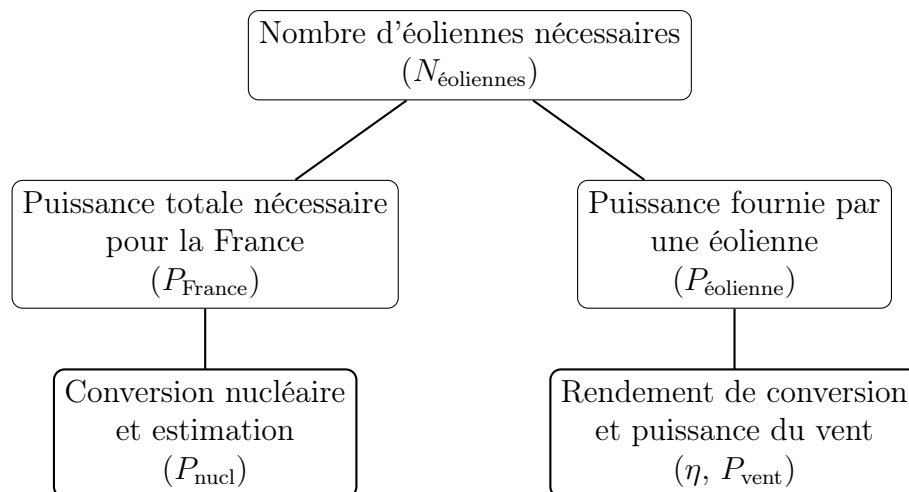
L'objectif de ce travail est d'estimer, par des raisonnements d'ordres de grandeur, le nombre d'éoliennes nécessaire pour alimenter entièrement la France en électricité. Nous allons pour cela relier différentes données et estimations. Le but est de montrer qu'avec quelques hypothèses, on peut approcher le résultat attendu et comprendre ce qui influence cet ordre de grandeur.

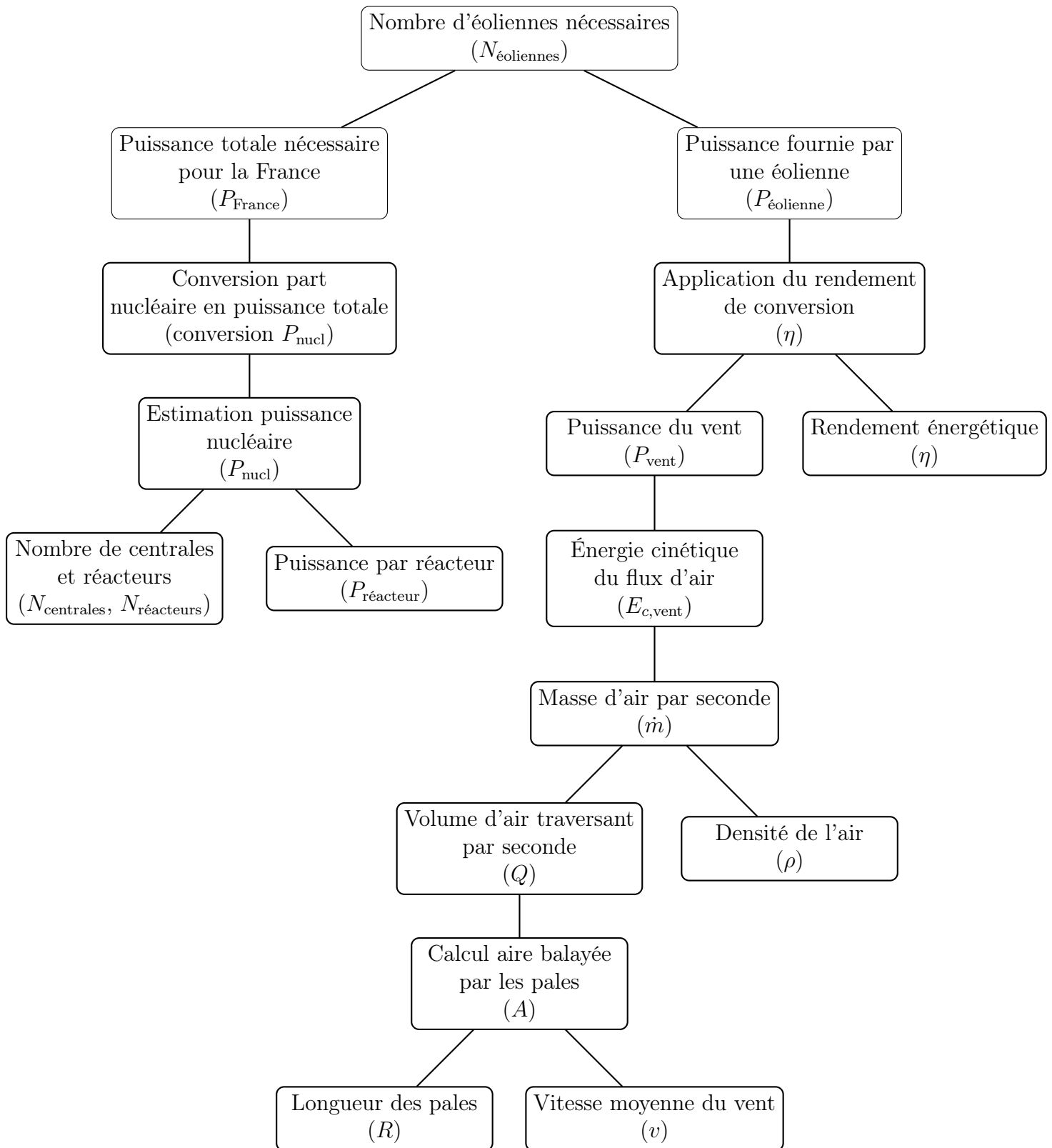
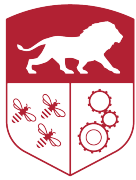
Ce compte rendu est initialement conçu pour être consulté sous forme interactive sur le site web disponible à l'adresse suivante : pierrelouis.net/ODG. La version PDF proposée ici constitue simplement une alternative plus formelle et pratique à télécharger et dépourvue du style plus journalistique propre aux articles du site.

2 Diagramme de Raisonnement

Le schéma simplifié ci-dessous présente, étape par étape, la logique reliant les données récoltées aux résultats numériques obtenus, notamment :

- La **puissance électrique d'une éolienne** ($P_{\text{éolienne}} \approx 1.04 \text{ MW}$),
- La **puissance du vent** disponible ($P_{\text{vent}} \approx 1.73 \text{ MW}$),
- L'**énergie cinétique du vent** ($E_{c,\text{vent}}$),
- L'**aire balayée** par les pales ($A \approx 2827 \text{ m}^2$), etc.





3 Détail des Calculs et Hypothèses

3.1 Consommation de la France

- **Nombre de réacteurs nucléaires en France (métropolitaine) :** En partant du nombre de régions en France (13), nous avons estimé qu'environ 7 régions fortement peuplées nécessitent 2 centrales chacune et 6 régions moins peuplées 1 centrale chacune, soit :

$$2 \times 7 + 1 \times 6 = 20 \text{ centrales.}$$

La plupart de ces centrales comptant en moyenne 3 réacteurs, nous obtenons un total d'environ 60 réacteurs nucléaires.

- **Production d'un réacteur :** Un réacteur nucléaire fonctionne par fission d'uranium :

- La fission d'1 gramme d'uranium-235 libère environ 100 GJ (soit 100 milliards de Joules), ce qui correspond à environ

$$\frac{100 \text{ GJ}}{3600} \approx 0.025 \text{ GWh} \quad (25 \text{ MWh}).$$

- En consommant environ 3 kg d'uranium-235 par jour (moyenne de 2 à 4 kg), on produit approximativement

$$3 \times 25 \text{ MWh} = 75 \text{ MWh},$$

ce qui représente une puissance thermique d'environ

$$\frac{75 \text{ MWh}}{24 \text{ h}} \approx 3 \text{ GW.}$$

- Avec un rendement thermique-électrique d'environ 33% (soit $\frac{1}{3}$), on obtient alors :

$$P_{\text{réacteur}} \approx 1 \text{ GW électrique}$$

par réacteur.

- **Ratio :** En France, nous partons du principe que 70% de l'électricité produite provient du nucléaire et 30% d'origine renouvelable.
- **Exportation :** La France exporte environ 1/5 de son électricité, consommant ainsi les 4/5 restants.

Ainsi, la consommation électrique française totale est estimée par :

$$P_{\text{France}} = (60 \times P_{\text{réacteur}}) \times \frac{100}{70} \times \frac{4}{5} \approx 68.5 \text{ GW.}$$

3.2 Production électrique d'une éolienne

- **Calcul de la puissance électrique d'une éolienne** Dans cette section, nous déterminons la puissance électrique produite par une éolienne en partant des caractéristiques de ses pales et des conditions de vent.
 - **Objectif** : Évaluer la puissance électrique générée en appliquant le rendement de conversion.
- **Dimensions d'une éolienne** Nous avons considéré une éolienne avec une longueur de pale $R = 30$ m, et donc un diamètre de pale de 2×30 m = 60 m. Ici, la hauteur de l'éolienne n'a pas d'impact direct sur nos calculs car nous négligeons les variations de vitesse du vent en fonction de l'altitude.
- **Vitesse du vent** Les éoliennes nécessitent une vitesse minimale de $v_{\min} = 3$ m/s et une vitesse maximale de $v_{\max} = 25$ m/s pour des raisons de sécurité. Pour le calcul, nous utilisons une vitesse moyenne de

$$v = 10 \text{ m/s} \quad (36 \text{ km/h}).$$

- **Facteur d'efficacité / rendement** Afin de simplifier notre modèle et en nous rapprochant de la limite théorique de Betz (environ 59,3%), nous avons choisi un rendement de conversion de :

$$\eta = 0.6.$$

Grâce à ces données, nous pouvons déterminer les différents éléments menant au résultat final :

- **Aire balayée par les pales** L'aire balayée correspond à la surface d'un cercle de rayon $R = 30$ m :

$$A = \pi R^2 \approx \pi \times 30^2 \approx 2827 \text{ m}^2.$$

- **Volume d'air traversant l'aire balayée (débit)** Le débit volumique est donné par :

$$Q = A \times v \approx 2827 \text{ m}^2 \times 10 \text{ m/s} \approx 28270 \text{ m}^3/\text{s}.$$

- **Masse d'air par seconde** En prenant la densité de l'air $\rho \approx 1.225 \text{ kg/m}^3$, la masse d'air traversant l'aire balayée par seconde est :

$$\dot{m} = \rho \times Q \approx 1.225 \times 28270 \approx 34634 \text{ kg/s}.$$

- **Énergie cinétique du vent et puissance du vent** La puissance du vent, représentant l'énergie cinétique disponible par unité de temps, se calcule en appliquant la formule de l'énergie cinétique $\frac{1}{2}mv^2$ à une masse d'air s'écoulant à travers l'aire balayée A à la vitesse v . En remplaçant la masse m par le débit massique $\dot{m} = \rho Av$, on obtient :

$$P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \rho A v^3,$$

ce qui illustre la dépendance cubique de la puissance par rapport à la vitesse du vent.

En substituant les valeurs, on obtient :

$$P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \times 1.225 \times 900\pi \times 10^3 \approx 1.73 \text{ MW}.$$

Ici, nous supposons que 100% de l'énergie cinétique est transmise aux pales (ce qui simplifie le modèle).

- **Puissance électrique obtenue de l'éolienne** En tenant compte du rendement de conversion $\eta = 0.6$, la puissance électrique produite par l'éolienne est :

$$P_{\text{éolienne}} = \eta \times P_{\text{vent}} \approx 0.6 \times 1.73 \text{ MW} \approx 1.04 \text{ MW}.$$

3.3 Résultat final

- **Nombre d'éoliennes** : Le nombre d'éoliennes nécessaire pour alimenter la France métropolitaine en électricité est alors estimé par :

$$N_{\text{éoliennes}} = \frac{P_{\text{France}}}{P_{\text{éolienne}}} \approx 68500.$$

- **Dimensions** : Nous avons utilisé pour notre modèle une éolienne composée de trois pales, chacune de longueur $R = 30m$. Comme dit précédemment, la hauteur de l'éolienne n'a pas d'impact direct sur nos calculs. Nous considérons que l'éolienne est de taille standard, donc d'environ 120m de hauteur.

4 Analyse et Limites

Cette analyse, même si rigoureuse, reste un modèle simplifié. Il est important d'en saisir clairement les limites :

- **Variabilité du vent** : Le vent n'est pas constant. Sa vitesse réelle varie grandement selon les conditions météorologiques et géographiques, ce qui affecterait significativement les performances réelles des éoliennes.
- **Hypothèses optimistes** : Le rendement retenu (60 %) est particulièrement optimiste, puisque dans la réalité, diverses pertes mécaniques et électriques viennent encore diminuer cette valeur.
- **Infrastructure et espace** : Installer plus de 68 000 éoliennes nécessite énormément d'espace et une infrastructure colossale, entraînant des défis économiques, environnementaux et sociétaux majeurs (acceptabilité sociale, perturbation des paysages, impacts écologiques).
- **Stabilité du réseau** : La production intermittente issue du vent exige des solutions de stockage de l'énergie ou des complémentarités avec d'autres sources d'énergie, compliquant davantage la transition énergétique.

Cette réflexion approfondie souligne donc que notre modèle est avant tout une première approche destinée à se rendre compte des défis de l'énergie éolienne pour alimenter un pays entier.

5 Conclusion

Ce compte rendu met en évidence que même avec des calculs simplifiés, on obtient une estimation instructive sur la faisabilité théorique d'alimenter toute la France par des éoliennes. Il nous rappelle surtout que le chemin vers une transition énergétique durable est semé d'embûches techniques, économiques et sociales, mais qu'il mérite néanmoins toute notre attention et nos efforts collectifs.