

TD3

III) TD 3 Mix Energétique – Pilotable et Intermittent, cas du nucléaire et de l'éolien

Les Hauts-de-France disposent d'un parc nucléaire (CNPE de Gravelines : 6 réacteurs de 900 MW chacun) et d'un grand parc éolien (Fruges : 70 éoliennes de 2 MW chacune).

Le prochain parc, Centre Manche 2, dont les travaux doivent débuter vers 2027, deviendra le plus grand parc éolien de France, avec une puissance installée de 1500 MW (100 éoliennes de 15 MW de puissance unitaire).

FICHE TECHNIQUE D'UNE ÉOLIENNE DU PARC DE FRUGES

Puissance nominale (conditions optimales) : 2,3 MW

Diamètre du rotor : 71 m

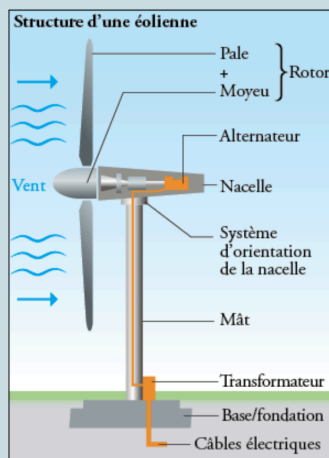
Vitesse de rotation du rotor : 6 à 21,5 tours par minute

La puissance du vent (en W) est donnée par :

$$P_V = 12 \times S \times \rho_{\text{air}} \times v^3$$

où S est l'aire balayée par les pales de l'éolienne (en m^2), ρ_{air} est la masse volumique de l'air ($1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ à $20 \text{ }^\circ\text{C}$) et v la vitesse du vent (en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Plus on monte en altitude et plus la vitesse des vents augmente.



D'après la loi de Betz, on ne peut pas récupérer 100 % de la puissance du vent, mais au maximum une proportion C_p . Pour une éolienne tri-pales, $C_p = 0,49$. La puissance d'une éolienne est donnée par :

$$P = C_p \times P_V$$

1) Puissance totale – Fruges vs. Gravelines

- **Parc(s) éolien(s) de Fruges** : 70 éoliennes. La fiche technique de l'éolienne du parc indique **2,3 MW** nominaux →

$$(P_{\text{Fruges}} = 70 \times 2,3 = 161 \text{ MW}).$$

- **CNPE de Gravelines** : 6 réacteurs de **900 MW** chacun →

$$(P_{\text{Gravelines}} = 6 \times 900 = 5,400 \text{ MW}).$$

2) Nombre d'éoliennes pour égaler la puissance de Gravelines

- Avec des machines **2 MW** : $(5,400/2 = 2,700)$ éoliennes.
 - Avec des machines **15 MW** : $(5,400/15 = 360)$ éoliennes.
-

3) Nombre d'éoliennes pour égaler la production annuelle (CF 85 % vs 45 %)

Hypothèses demandées : **nucléaire CF = 85 %**, **éolien offshore CF = 45 %**.

On égalise l'énergie annuelle :

$$N = \frac{P_{\text{nuke}} \times CF_{\text{nuke}}}{P_{\text{turbine}} \times CF_{\text{wind}}}$$

- **Turbine 2 MW** : $(N = \frac{5,400 \times 0,85}{2 \times 0,45} \approx 5,100)$ éoliennes.
- **Turbine 15 MW** : $(N = \frac{5,400 \times 0,85}{15 \times 0,45} \approx 680)$ éoliennes.

Vérif énergie annuelle de Gravelines (ordre de grandeur) : $(5,4 \text{ GW}) \times 8,760 \text{ h} \times 0,85 \approx \mathbf{40,2 \text{ TWh/an}}$. (cohérent avec les historiques publics) ([Wikipedia](#))

4) Limites et proposition pour un remplacement 100 % éolien

- **Limites** de l'équivalence par facteur de charge :
 - Le **CF éolien est subi** (dépend du vent, variable, corrélé régionalement), donc la **puissance garantie** et l'**adéquation instantanée** ne sont pas assurées.
 - Besoin de **réserves**, **stockage**, **flexibilité de la demande**, **renforcement réseau** et **pilotage** pour passer les creux de production.
 - Le **CF nucléaire est choisi** au sens où l'outil est **pilotable** : on peut décider quand produire (modulation/arrêts planifiés), indépendamment de la météo.
- **Feuille de route 100 % éolien** (idée de mix et d'infrastructures) :
 - **Surdimensionnement** de la capacité éolienne (overbuild) par rapport à la moyenne nécessaire.
 - **Stockages** multi-échelles : batteries (intra-jour), **STEP** et **hydrogène/PtX** (inter-journalier à saisonnier).

- **Flexibilité** (effacement industriel, pilotage conso, tarification dynamique), **réseaux** (renforcement, interconnexions), et **backup** pilotable bas-carbone transitoire si nécessaire.
- **Diversification géographique et technologique** (onshore + offshore, couplage avec solaire) pour lisser la variabilité.

5) Comparaison d'empreinte CO₂ annuelle (à 100 % de CF pour simplifier)

À puissance installée identique (**5,4 GW**), l'énergie annuelle serait ($5,4 \times 8,760 = \mathbf{47,3\ TWh}$). Les émissions annuelles dépendent alors des **facteurs ACV** (gCO₂e/kWh) :

- **Nucléaire (France/Europe, ACV)** : ~5,5–6 gCO₂e/kWh (médiane UNECE ≈ 5,5 ; base ADEME ≈ 6). → ≈ **0,26–0,28 MtCO₂e/an**.
- **Éolien onshore** : ~11–16 gCO₂e/kWh (IPCC/UNECE ; ADEME ~14,1). → ≈ **0,52–0,67 MtCO₂e/an**.
- **Éolien offshore** : ~12–23 gCO₂e/kWh (UNECE ; ADEME ~15,6). → ≈ **0,57–1,09 MtCO₂e/an**.

Conclusion : sur une base ACV, **nucléaire et éolien sont tous deux très bas-carbone**, l'ordre de grandeur annuel reste < **1,1 MtCO₂e** pour 5,4 GW. **Le nucléaire ressort généralement un peu plus bas** que l'éolien (surtout offshore haut de fourchette), mais **les fourchettes se recoupent** selon hypothèses (mix amont, logistique, durée de vie, facteurs régionaux). Le différentiel CO₂ n'est **pas l'argument principal** pour trancher entre ces deux options ; la décision se joue plutôt sur **pilotabilité, coûts système, réseaux, acceptabilité, calendrier et risques**.

Sources

- ESTIA / 2025-2026 / JB Jarin — **TD 3 : Mix énergétique, pilotable & intermittent (nucléaire / éolien)** — Énoncé et données.
- **UNECE (2021)** — *Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options* (PDF) — valeurs ACV : nucléaire ≈ 5,5 gCO₂e/kWh ; éolien onshore < 16 ; offshore < 23.
- **ADEME (Base Carbone / Bilans-GES)** — facteurs ACV pour électricité nucléaire en France ≈ 6 gCO₂e/kWh. ([sfen.org](https://www.sfen.org))
- **Les Énergies Renouvelables (2025)** — synthèse ADEME : éolien **onshore ≈ 14,1** gCO₂e/kWh ; **offshore ≈ 15,6** gCO₂e/kWh. ([ECOinfos](https://www.ecoinfos.com))

- **Wikipedia / EDF / presse** — données de cadrage public sur **Gravelines** (6×900 MW ; puissance ~5,46 GW ; prod. annuelle typique). ([Wikipedia](#))