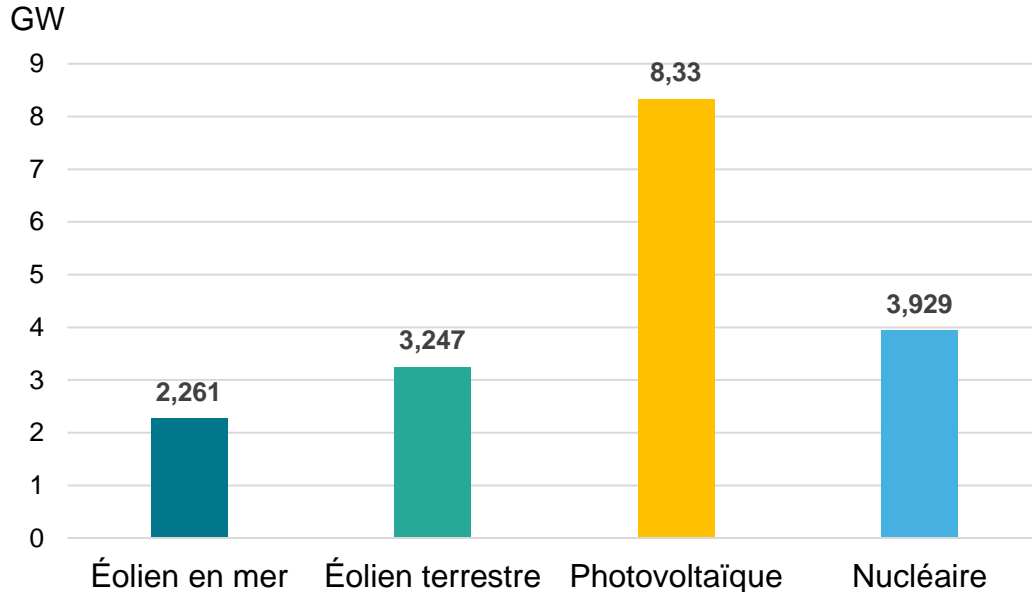


# Mix Électrique Renouvelable + Nucléaire : **10 Actions pour la Réussite**

Prof. Damien ERNST – ULiège



# Capacité des sources d'électricité décarbonées en Belgique à la fin de 2023



## **Observation :**

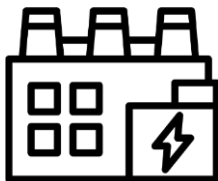
La capacité installée du nucléaire est relativement faible (3,929 GW) comparée à la capacité installée totale de l'ensemble des énergies renouvelables (13,838 GW).

Vu ces chiffres, le nucléaire est-il vraiment important pour la production d'électricité décarbonée en Belgique ?

# Introduction du facteur de charge :

## Passer d'une capacité de production à une quantité d'énergie produite

Le facteur de charge, c'est le rapport entre



**la production maximale  
techniquement possible** sur  
la base de la capacité installée

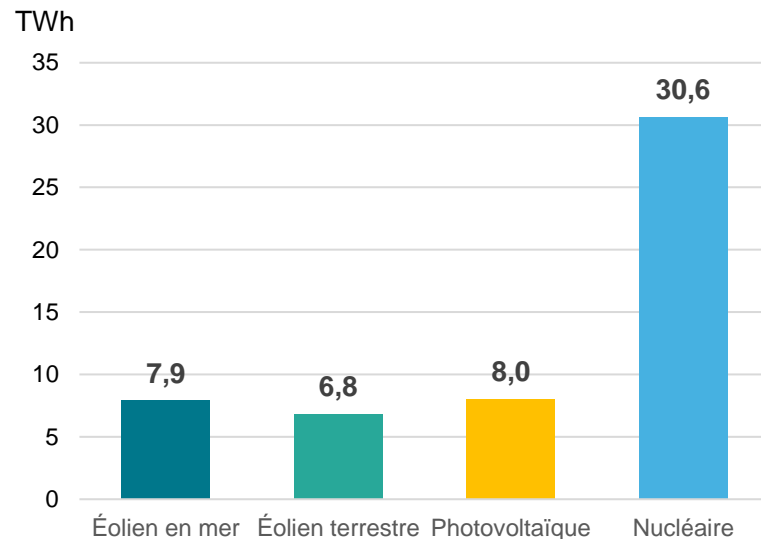
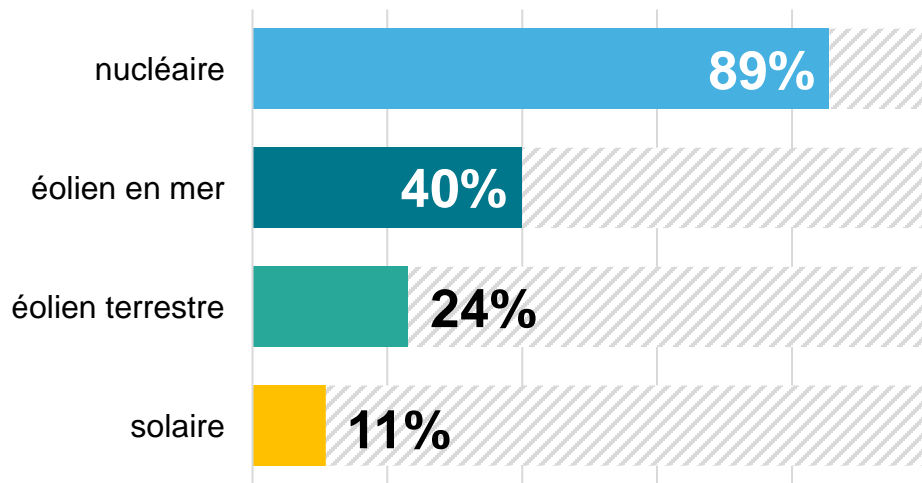
et



**la quantité d'électricité  
effectivement produite.**

Un facteur de charge élevé représente une meilleure utilisation de la capacité installée de production d'énergie.

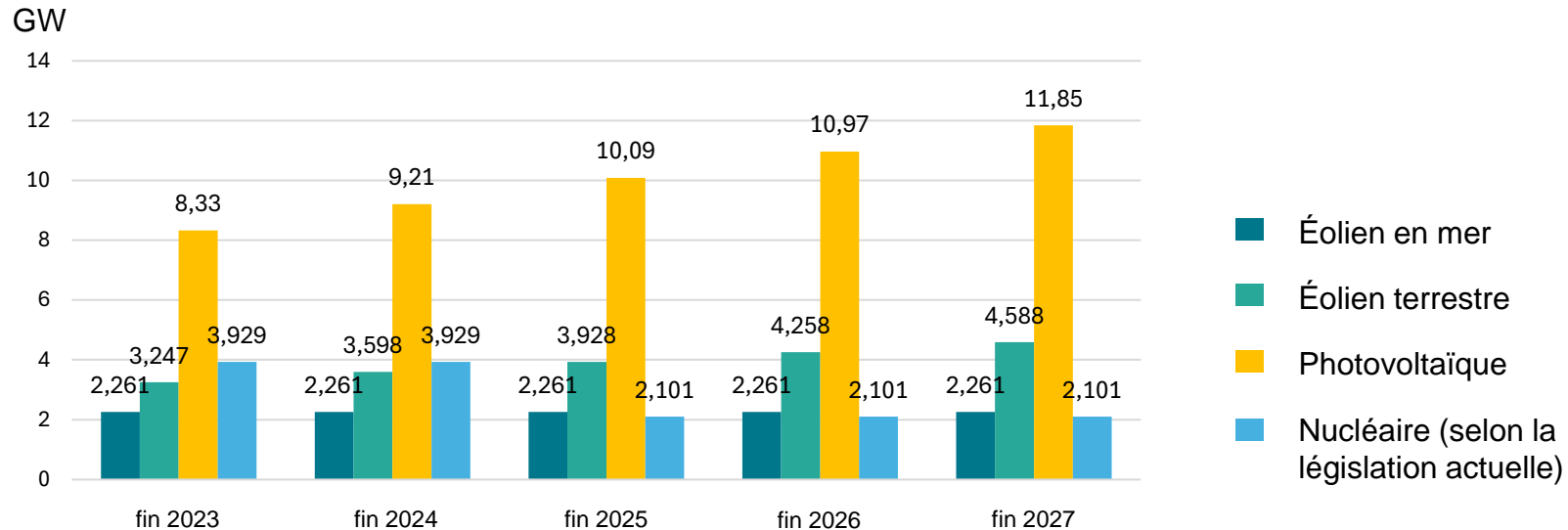
# Calcul de la production d'électricité décarbonée en Belgique basée sur la capacité des sources décarbonées à la fin de 2023 et leur facteur de charge



## **Observation :**

Malgré une capacité installée moindre, le nucléaire permet de produire plus d'électricité grâce à son facteur de charge plus élevé.

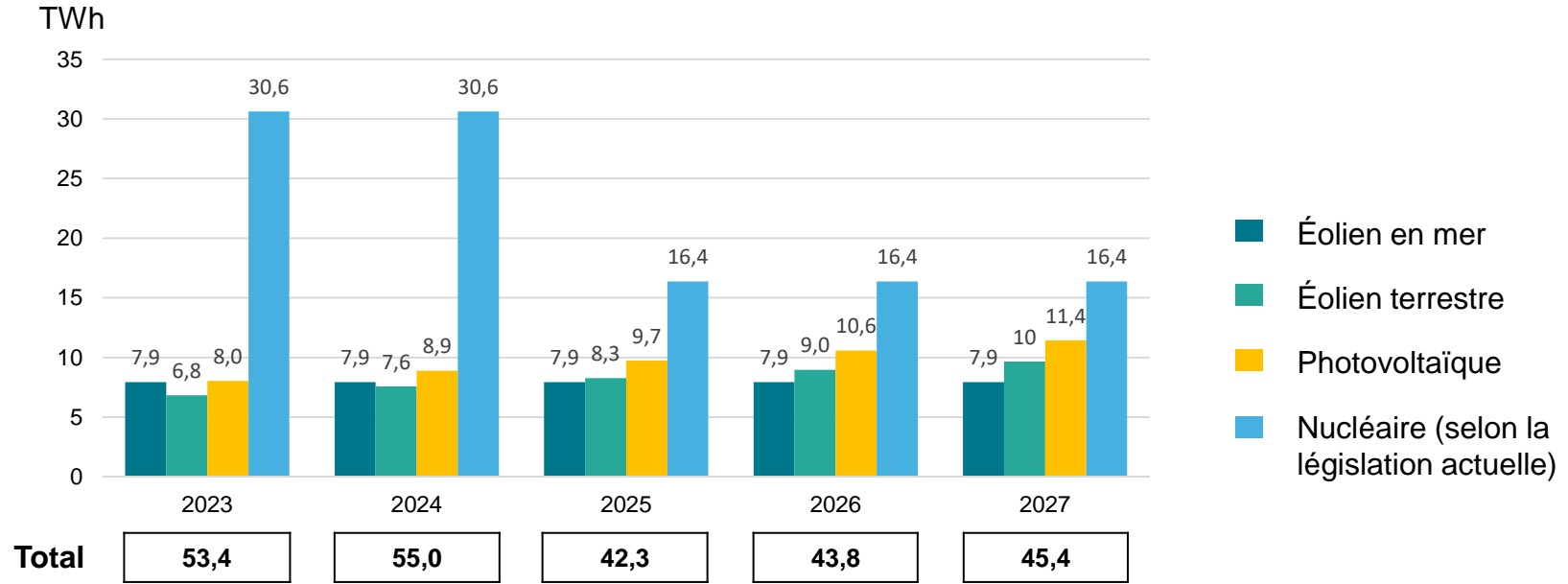
# Prévision de la capacité des sources d'électricité décarbonées en Belgique jusqu'à fin 2027



## Observations :

- Chute de la capacité du nucléaire à partir de 2025 avec l'arrêt de Doel 1, Doel 2 et Tihange 1.
- Stagnation de l'éolien en mer, en raison des limites géographiques et des problèmes de connexion électrique.
- Faible progression de l'éolien terrestre (problèmes NIMBY).

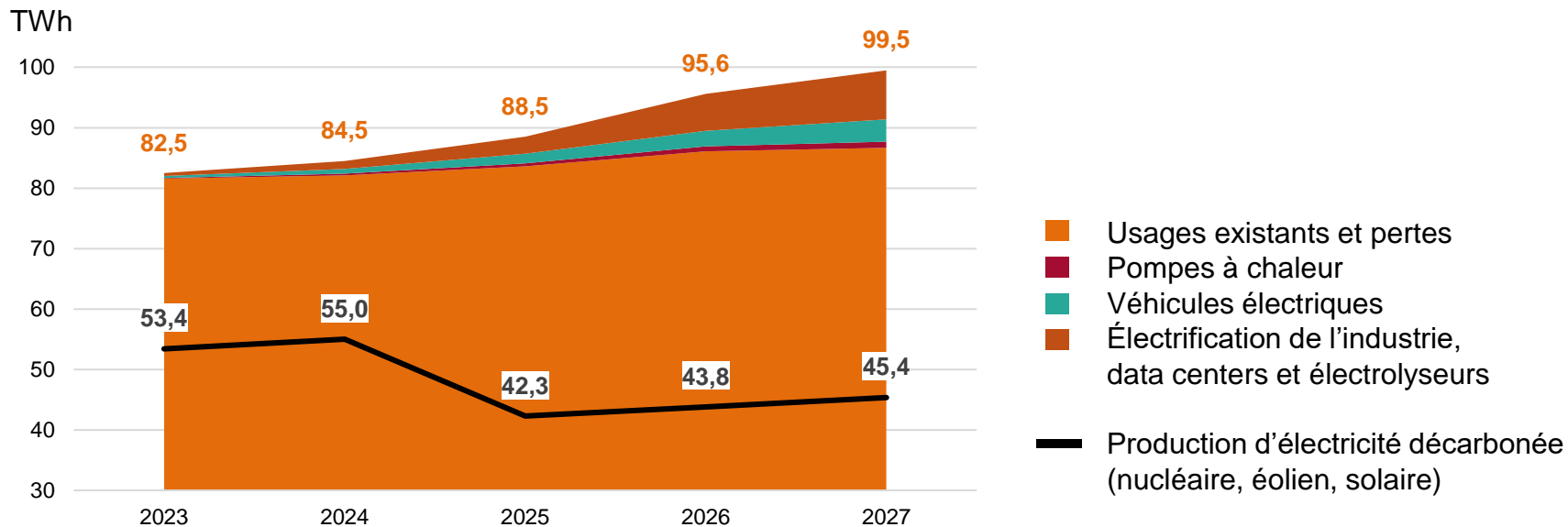
# Prévision de la production d'électricité décarbonée en Belgique jusqu'à fin 2027



## Observation :

La production totale d'électricité de ces sources d'électricité décarbonées, qui était de 53,4 TWh en 2023, est estimée à 42,3 TWh pour l'année 2025, ce qui représente **une diminution d'environ 20%**.

# Prévision de la consommation d'électricité en Belgique jusqu'à fin 2027



## Observation :

Il y a un écart considérable entre la production d'électricité décarbonée et la consommation d'électricité qui ne cesse de croître.



## Attention : le problème dépasse celui du déficit annuel de production d'électricité décarbonée !



Deux principales raisons :

1. Des longues périodes de déficit à cause de la variabilité des énergies renouvelables, notamment dès l'hiver 2025-2026. Cela nécessiterait d'**investir dans des capacités au gaz**. En effet, en cas de Dunkelflaute (période avec très peu voire aucune production solaire et éolienne), il est illusoire de penser que les batteries pourraient suffire à résoudre ces problèmes de déficit.
2. Des problèmes physiques au niveau du réseau électrique, tels que **les congestions** causées par les éoliennes, **les surtensions** liées au photovoltaïque au niveau du réseau basse tension, le risque accru de **rupture de synchronisme** ou encore **une fréquence plus instable** due à une perte d'inertie du réseau.

Les problèmes liés au Dunkelflaute, aux risques de rupture de synchronisme et à l'instabilité de la fréquence pourraient être atténués en misant davantage sur le nucléaire.



**Face à cette situation très difficile,  
il faut un plan d'action fort.**

**Je propose par la suite 10 actions  
concrètes à implémenter.**



# Mon plan d'action

- 1 Suppression de la loi de sortie nucléaire de 2003
- 2 Prolongation de l'activité des réacteurs nucléaires existants
- 3 Plan pour la construction de nouveaux réacteurs nucléaires de grande taille
- 4 Construction de petits réacteurs modulaires SMR 4<sup>e</sup> génération
- 5 Développement des plateformes de flexibilité locale
- 6 Accélération du déploiement des compteurs communicants
- 7 Exploitation de la flexibilité domestique au moyen de contrats d'électricité innovants
- 8 Réalisation du projet de la Boucle-du-Hainaut
- 9 Développement des Centres d'Énergie Renouvelable Distants (CERD)
- 10 Investissement dans les technologies du futur : éoliennes mobiles flottantes

1

## Suppression de la loi de sortie nucléaire de 2003

SERVICE PUBLIC FEDERAL ECONOMIE,  
P.M.E., CLASSES MOYENNES ET ENERGIE  
[C - 2022/33914]  
11 OCTOBRE 2022. — Loi modifiant la loi du 31 janvier 2003 sur la  
sortie progressive de l'énergie nucléaire à des fins de production  
industrielle d'électricité

Loi sur la sortie progressive  
de l'énergie nucléaire du 31 janvier 2003 :

**À abroger !**

*« Les centrales nucléaires sont désactivées  
aux dates définies et ne peuvent plus produire  
d'électricité dès cet instant. »*



On doit permettre la prolongation  
de toutes les centrales qui  
peuvent être prolongées.

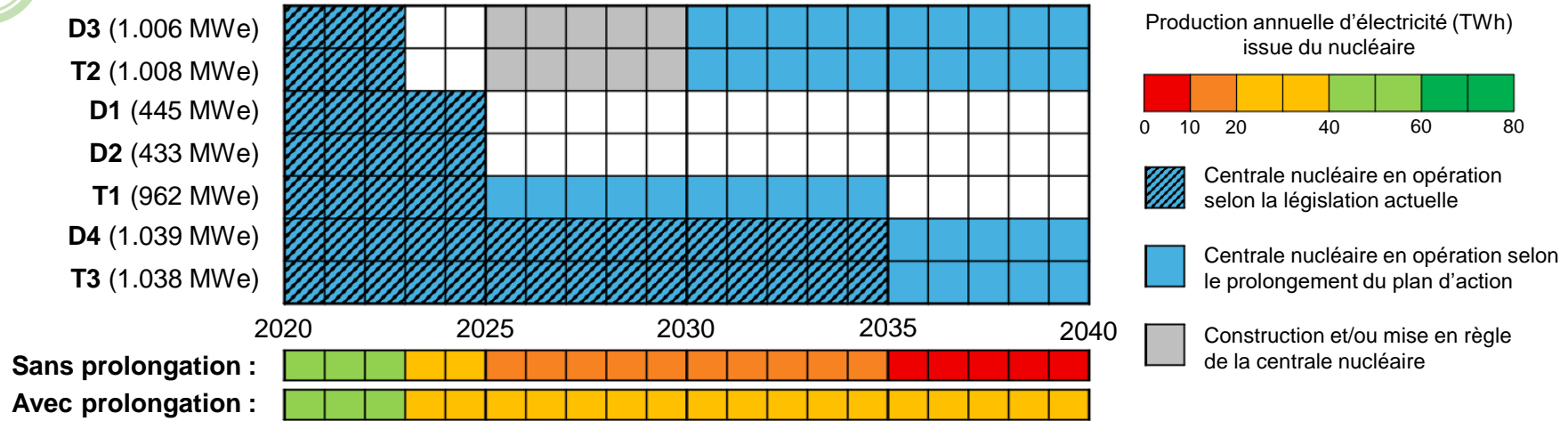
*« Aucune nouvelle centrale nucléaire destinée à  
la production industrielle d'électricité à partir de la  
fission de combustibles nucléaires, ne peut être  
créée et/ou mise en exploitation. »*



On doit permettre la construction  
de nouvelles centrales.

# 2

## Prolongation de l'activité des réacteurs nucléaires existants



Les réacteurs Doel 3 et Tihange 2 n'ont pas encore été démontés.

Reconstruction des salles des machines + mise en règle → **Remettre en opération dès 2030.**

Le réacteur Tihange 1 et ses équipements ont déjà été remplacés pour permettre une prolongation de 10 ans jusque 2025. La majorité des nouveaux auxiliaires ont une durée de vie de 20 voire 30 ans.

→ **Prolonger l'exploitation jusque 2035.**

Révision des équipements et maintenance de Doel 4 et Tihange 3 en continu pendant leur fonctionnement.

→ **Prolonger l'exploitation jusque 2045.**

# 3

## Plan pour la construction de nouveaux réacteurs nucléaires de grande taille

Disponibilité de 3 modèles de réacteurs nucléaires PWR\* nouvelle génération :

1. plus sûres ;
2. plus efficaces ;
3. ils proviennent de pays démocratiques respectant les normes européennes ;
4. deux modèles sont déjà en opération, tandis que le troisième, une version simplifiée d'un modèle en opération, est actuellement en construction.



**AP1000**

Conçu par Westinghouse (USA).



**APR1400**

Conçu par Kepco (Corée du Sud).



**EPR2**

Conçu par EDF (France),  
amélioration de l'EPR.

\*Réacteur contenant de l'eau sous pression.

# Installation de 2 réacteurs AP1000 près ou sur le site de Tihange

Proposition d'installer 2 réacteurs AP1000 à proximité ou sur le site de Tihange pour plusieurs raisons :

1. la présence de personnel qualifié dans la région,
2. la disponibilité d'une source d'eau pour le refroidissement,
3. la possibilité de réutiliser l'infrastructure électrique existante.

Il faudrait une surface au sol d'environ **44 hectares** pour l'installation.

D'où viennent les 44 hectares ?

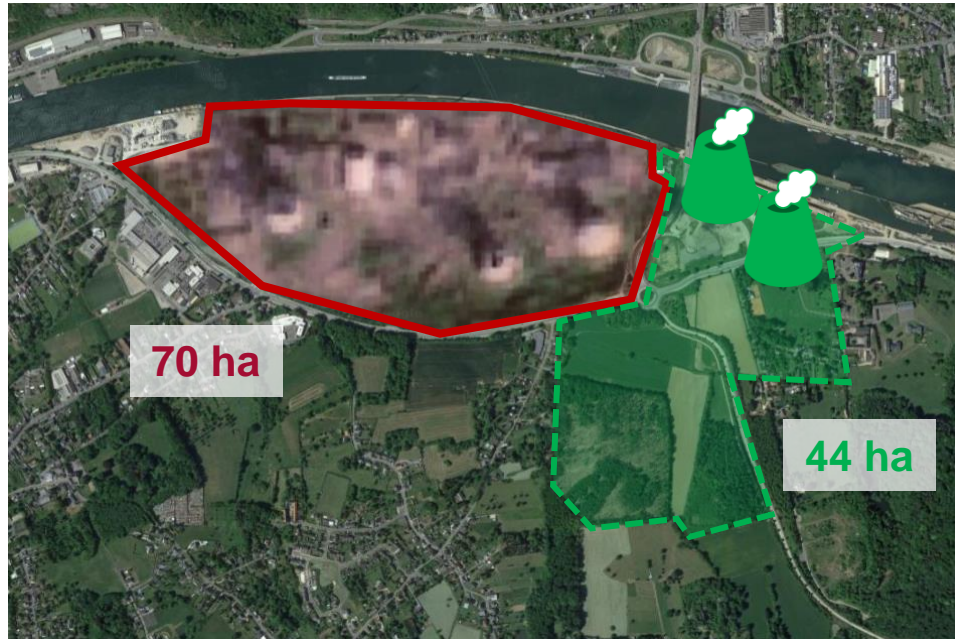
**Hypothèse** : Pour une centrale avec un réacteur PWR et les auxiliaires nécessaires à son exploitation, on considère 200 m<sup>2</sup> / MWe net.

**Calcul** : 2 AP1000 = 2 x 1.100 MWe net = 2.200 MWe net  
2.200 MWe net x 200 m<sup>2</sup> = 440.000 m<sup>2</sup> = 44 hectares

## 1<sup>ère</sup> proposition – Nouveau site à Amay

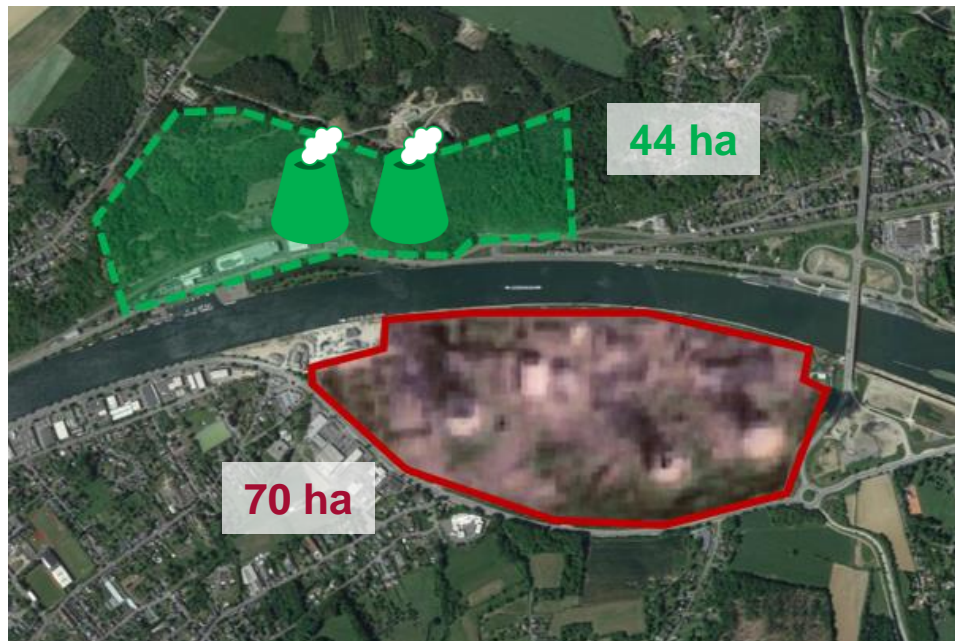


## 2<sup>ème</sup> proposition – Extension du site de Tihange Rive droite de la Meuse





### 3<sup>ème</sup> proposition – Extension du site de Tihange Rive gauche de la Meuse



# Installation de 2 réacteurs EPR2 sur le site de Doel

Le site de Doel est idéal pour une extension pour plusieurs raisons :

1. suffisamment d'espace,
2. pas d'habitants à proximité,
3. infrastructure électrique déjà en place.

Il faudrait une surface au sol d'environ **67 hectares** pour l'installation.

D'où viennent les 67 hectares ?

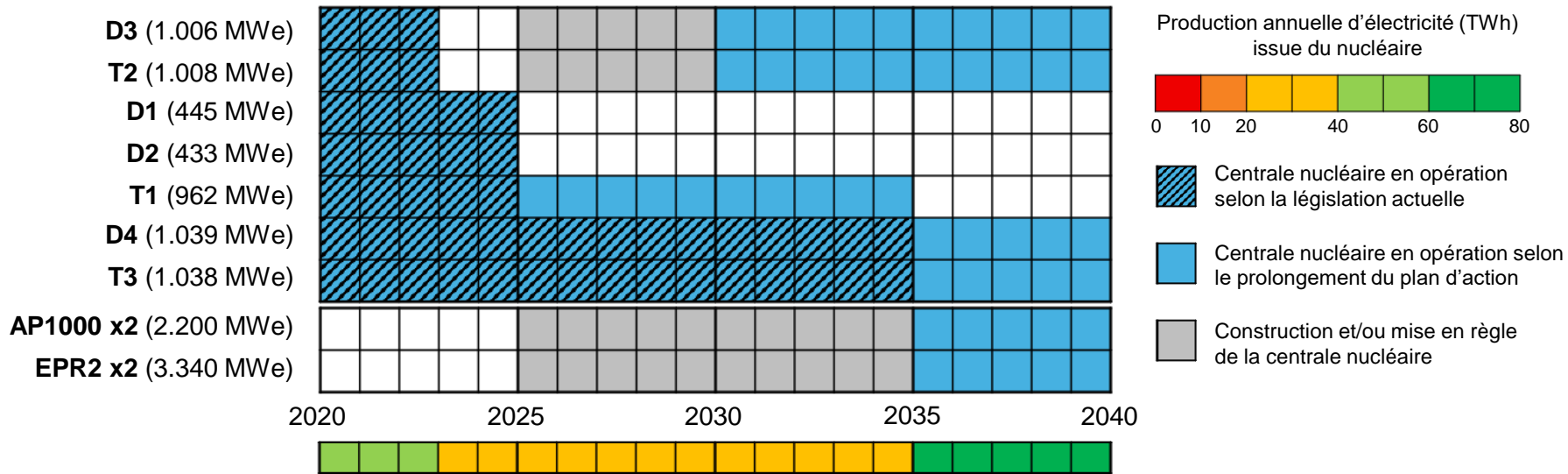
**Hypothèse** : Pour une centrale avec un réacteur PWR et les auxiliaires nécessaires à son exploitation, on considère 200 m<sup>2</sup> / MWe net.

**Calcul** : 2 EPR2 = 2 x 1.670 MWe net = 3.340 MWe net  
3.340 MWe net x 200 m<sup>2</sup> = 668.000 m<sup>2</sup> ≈ 67 hectares

## Proposition – Extension du site de Doel



## Calendrier des disponibilités du nucléaire en considérant les nouveaux investissements



Démarrer les travaux des 4 réacteurs dès 2025 pour une mise en opération à partir de 2035. La durée des travaux des APR1400 à Barakah étaient de 8 ans pour chaque réacteur, en partant sans expérience.

→ **Ambitieux, mais pas impossible !**

À partir de 2035, il est possible d'atteindre une production annuelle de 82,6 TWh d'électricité d'origine nucléaire au moyen d'une capacité totale de 9.550 MWe, soit plus que ce que la Belgique n'a jamais eu.

## Small Modular Reactor (SMR) 4<sup>e</sup> génération

**État d'avancement** : Recherche/prototype industriel.

**Consommation d'uranium** : 50 à 100 fois plus d'électricité avec la même quantité de minerai d'uranium car il s'agit d'un réacteur à neutrons rapides permettant de « brûler » également l'U238.

**Capacité** : De 50 à 300 MWe, capacité modulaire.

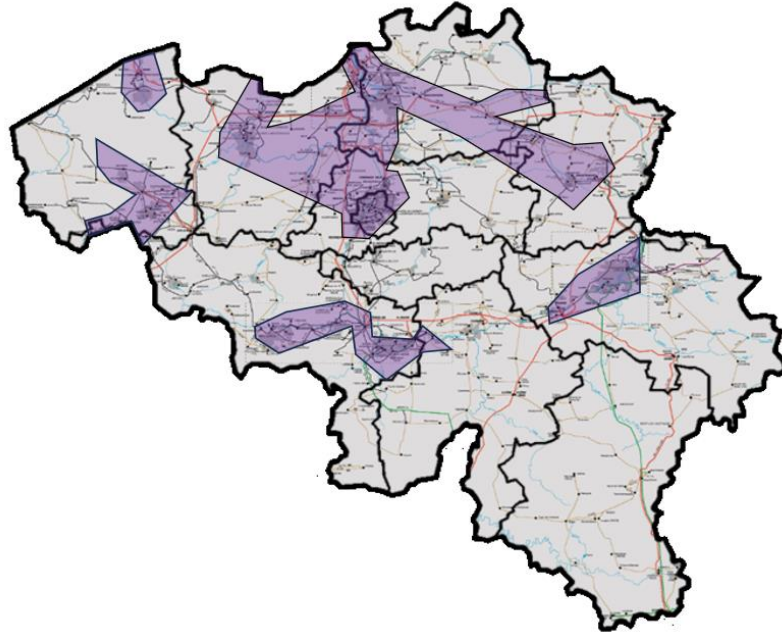
**Sécurité** : Systèmes de sécurité passifs supplémentaires.

**Production d'autres commodités** : Chaleur et hydrogène.  
La valorisation de ces commodités permet une meilleure rentabilité.

# Choix des sites pour l'installation des SMR 4<sup>e</sup> génération en Belgique

Niveau de tension pour connecter les SMRs : à partir de 150 kV.  
→ Peu de contraintes liées aux réseaux.

**Zones industrielles** à privilégier pour simplifier la valorisation de la chaleur et la consommation d'hydrogène.

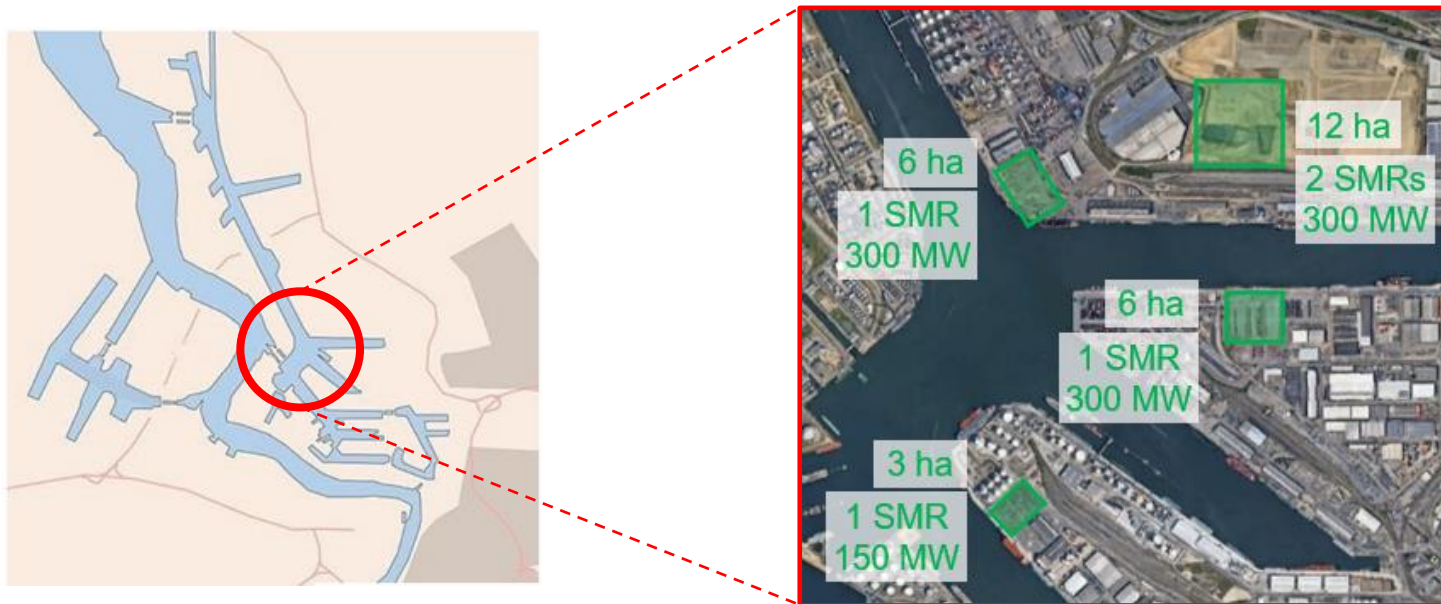


## Focus sur le port d'Anvers

### *Pourquoi installer des SMRs au port d'Anvers ?*

Il s'y trouve de nombreuses industries chimiques et manufacturières qui nécessitent de grandes quantités de chaleur pour leurs processus de production.

L'hydrogène peut également être utilisé dans des usines localisées dans le port.



# 5

## Développement des plateformes de flexibilité locale

### Plateforme de flexibilité locale :

Gestion décentralisée et proactive de la demande et de l'offre d'électricité à une échelle locale pour éviter les problèmes sur le réseau.

### *Un exemple de fonctionnement en 3 étapes clés :*

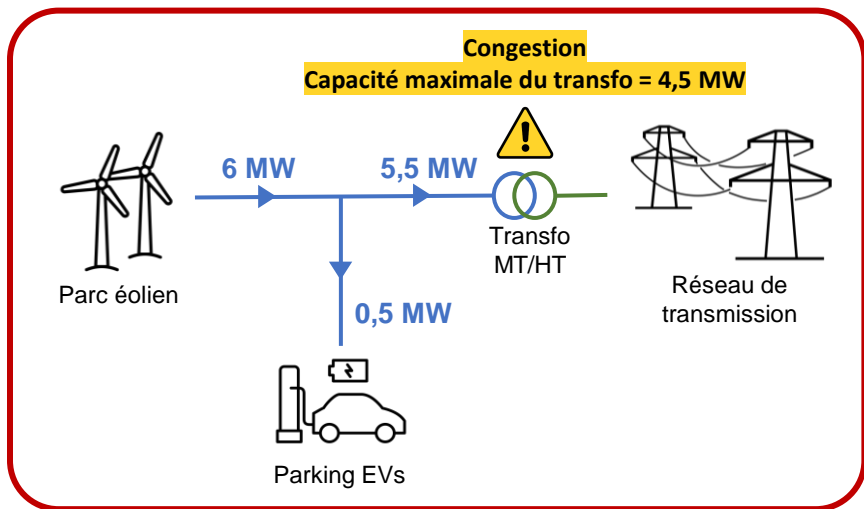
1. Le gestionnaire du réseau de distribution (GRD) alerte d'un problème sur le réseau de distribution et envoie des consignes de modulations aux utilisateurs du réseau pour l'éviter.
2. Les utilisateurs peuvent suivre ces consignes ou chercher une solution sur une plateforme de flexibilité locale.
3. Les utilisateurs qui apportent une solution sont rémunérés par la plateforme.



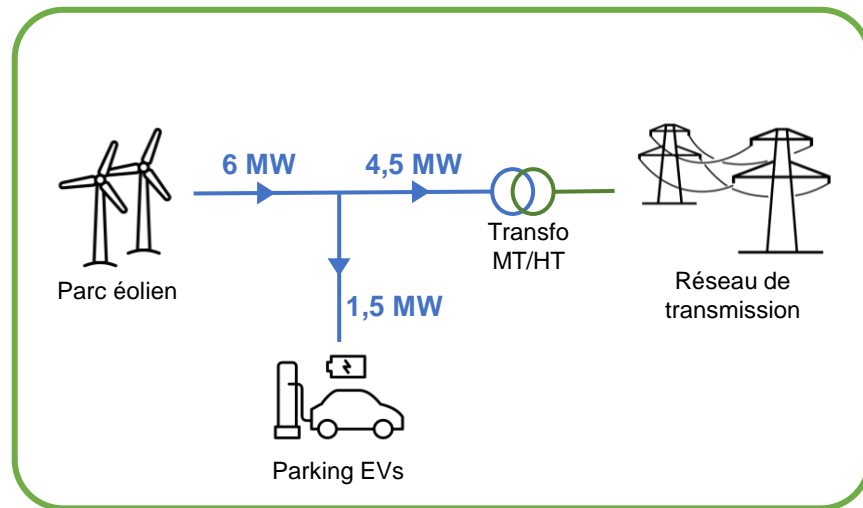
## Exemple d'application d'une plateforme de flexibilité locale

Un parc éolien produit trop d'électricité, ce qui cause une congestion sur le transformateur MT/HT. Le GRD demande au propriétaire du parc de réduire la production de ses éoliennes de 1 MW. Celui-ci consulte la plateforme de flexibilité locale et découvre sur cette dernière qu'un parking de voitures électriques (EV) peut consommer 1 MW supplémentaire. Il décide d'acheter ce service pour éviter la réduction de production de son parc éolien.

### Problème de congestion



### Résolution du problème de congestion



# 6

## Accélération du déploiement des compteurs communicants

**Le compteur communicant** mesure et transmet la consommation d'électricité par période de marché. Il permet à son propriétaire de réduire sa facture, notamment grâce à :

- un meilleur contrôle de la consommation ;
- une optimisation de l'autoconsommation ;
- une consommation de l'énergie lorsque les tarifs sur le marché sont les plus avantageux ;
- et éventuellement une future participation aux plateformes de flexibilité locale.



En février 2023, la Flandre comptait 2 millions de compteurs communicants connectés au réseau, tandis que la Wallonie n'en avait que 155.000.

### **Une Wallonie trop lente !**

Il faut rattraper le retard par rapport à la Flandre et équiper 100% des clients belges de compteurs communicants le plus tôt possible.

## Exploitation de la flexibilité domestique au moyen de contrats d'électricité innovants

**Contrats d'électricité actuels : soit à prix fixe, soit à prix variable.**

Les prix variables sont mis à jour mensuellement en fonction de la moyenne pondérée des prix horaires de référence du marché de l'électricité.

Aucun incitant pour consommer au bon moment !

**Encore trop peu de tarifs dynamiques.**

Pour les tarifs dynamiques, la facturation de l'électricité consommée se fait en multipliant la quantité horaire par le prix horaire correspondant. Des contrats dynamiques inciteraient donc les gens à consommer au bon moment. En effet, le prix horaire de l'électricité est élevé quand le renouvelable est peu disponible.

Mais ces contrats sont bien trop peu répandus, notamment à cause d'un manque de compteurs communicants, qui sont nécessaires dans ce contexte.

## Au-delà du simple contrat à prix dynamique : un exemple de contrat plus innovant et plus vert

### **Contrat d'achat d'électricité verte à long terme :** (Power Purchase Agreement (PPA) en anglais)

Ce contrat offre la possibilité, pour chaque période de marché, de bénéficier d'un pourcentage spécifique de la production d'une éolienne.

### **Gestion de l'électricité résiduelle :**

Cette option permet de vendre ou d'acheter l'électricité résiduelle sur le marché spot.

Ce genre de contrat permettrait d'encourager la consommation d'électricité verte produite localement et de promouvoir l'acceptation des éoliennes locales en établissant des circuits courts entre la production d'éolienne et sa consommation.

**Variante :** Au lieu d'opter pour un PPA, pourquoi ne pas envisager la propriété partagée d'une éolienne ? L'acheteur bénéficierait directement d'une partie de sa production.

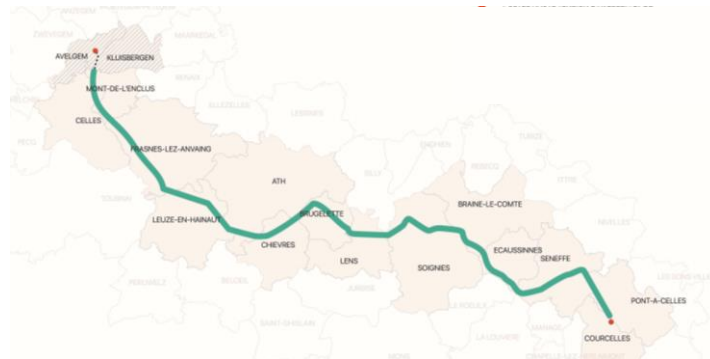
## Qu'est-ce que ce projet implique ?

Il s'agit de la mise en place d'une nouvelle liaison aérienne en courant alternatif de 380 kV avec une capacité de 6 GW.

## Pourquoi est-ce que ce projet est important ?

- Impossible d'augmenter la capacité éolienne en mer de plus de 2 GW sans cette boucle.
- Chainon indispensable pour garantir la sécurité d'approvisionnement.

Le dossier n'avance pas assez rapidement, principalement à cause d'un petit groupe d'opposants très actifs et de la politisation du dossier, avec des promesses du type :  
« *Votez pour moi, je m'oppose à cette horrible ligne électrique* ».



## 9

## Développement des Centres d'Énergie Renouvelable Distants (CERD)

Une option supplémentaire pour diversifier l'approvisionnement énergétique de la Belgique consiste à **importer du gaz synthétique provenant de Centres d'Énergie Renouvelable Distants (CERD)**. Ces CERD exploitent l'abondance des sources d'énergie renouvelable dans des régions éloignées.

### **Exemple : Un CERD dans le désert de Namibie.**

Des panneaux solaires et des éoliennes captent en abondance de l'énergie qui est ensuite transportée vers la côte namibienne via une ligne à haute tension et utilisée pour produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. En combinant cet hydrogène avec du CO<sub>2</sub> capturé dans l'air, du méthane synthétique est produit. Ce gaz est ensuite exporté par pipeline ou par navire jusqu'au terminal LNG de Zeebrugge.

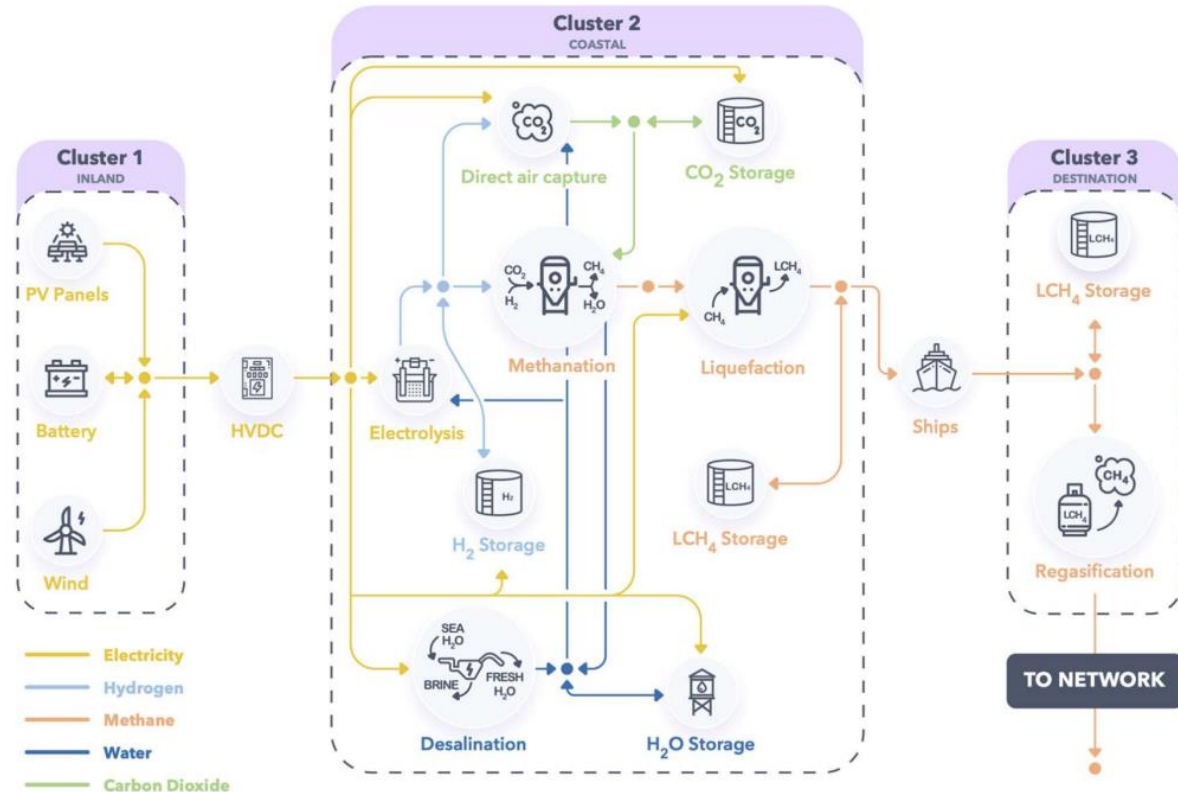


## Représentation d'un CERD dans le désert de Namibie



Représentation artistique d'une infrastructure où l'énergie solaire et la capture directe de  $\text{CO}_2$  dans l'air sont utilisées pour produire du  $\text{CH}_4$ .  
Le gaz synthétique est ensuite liquéfié et expédié vers les centres de consommation.

# Modélisation d'un CERD dans le désert du Sahara algérien





## Investissement dans les technologies du futur : éoliennes flottantes mobiles

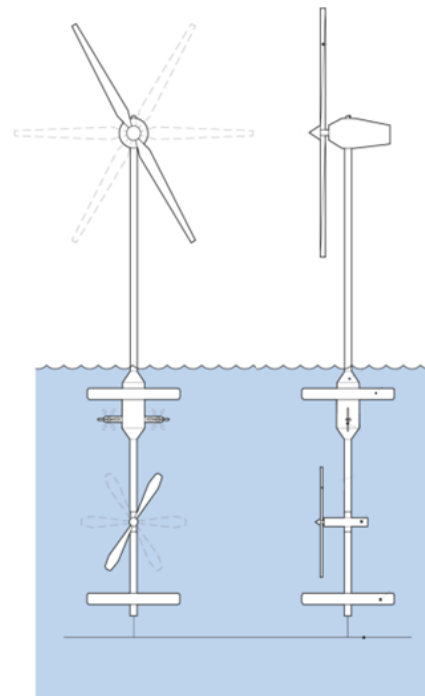
Les hautes mers sont les zones situées au-delà des eaux territoriales des pays côtiers. L'éolien en haute mer présente de nombreux avantages :

- des vitesses de vent excellentes,
- une stabilité géopolitique due à l'absence de contrôle national.

**Des éoliennes flottantes mobiles** sont déjà à l'étude pour collecter l'énergie de ce vent en haute mer. Elles pourront être utilisées pour produire des carburants synthétiques comme de l'hydrogène ou du CH<sub>4</sub> neutre en carbone.

**Cependant, aucune considération par notre politique énergétique !**

Il est temps d'examiner les aspects juridiques, économiques et techniques de l'exploitation de l'énergie renouvelable dans les hautes mers.





Représentation artistique d'une structure flottante mobile sur laquelle est installée une éolienne.  
Au moyen de l'énergie éolienne, cette mini-usine synthétise de l'hydrogène qui est stocké à l'intérieur de la structure.  
Un navire-citerne vient ensuite récupérer l'hydrogène synthétique.

# Références

Ernst, D. (2019, 5 novembre). *Nuclear: the dreaming reality*.  
<https://orbi.uliege.be/handle/2268/240858>

Dachet, V., Lokotar, I. et Ernst, D. (2024, 17 mai). *Les Centres d'Énergie Renouvelable Distants (CERD). Une opportunité de leadership que l'Europe doit saisir*.  
<https://confrontations.org/les-centres-denergie-renouvelable-distants-cerd-une-opportunit-e-de-leadership-que-leurope-doit-saisir/>

Ernst, D. et Sutera, A. (2023, 1 décembre). *Rethinking electricity retail contracts for leveraging flexibility*.  
<https://orbi.uliege.be/handle/2268/309281>

Ernst, D. (2024, 30 avril). *La Belgique peut gagner son indépendance énergétique en haute mer*.  
<https://damien-ernst.be/2024/04/30/la-belgique-peut-gagner-son-independance-energetique-en-haute-mer/>

Ernst, D. (2023, 24 mai). *La politisation de la Boucle du Hainaut compromet l'avenir de la province, du pays et du climat*.  
<https://damien-ernst.be/2023/05/24/politisation-de-boucle-hainaut-compromet-lavenir-de-province-pays-climat/>

# Références

Loi 2022/33914 du 03 janvier 2022 modifiant la loi du 31 janvier 2003 sur la sortie progressive de l'énergie nucléaire à des fins de production industrielle d'électricité.

FEPEG - Fédération Belge des Entreprises Électriques et Gazières. (2022). *Statistiques électricité*.  
<https://www.fepeg.be/fr/statistiques-electricite>

Forum Nucléaire. (2024). *Mix électrique belge 2023 : chiffres de l'année*.  
<https://www.forumnucleaire.be/actus/mix-electrique-belge-2023-chiffres-de-lannee>

SPF Economie. (2024). *Rapport de monitoring de la sécurité d'approvisionnement*.  
<https://economie.fgov.be/sites/default/files/Files/Energy/epe-2023-version-finale.pdf>

Connaissances Des Énergies. (2024, 21 mai). *SMR : petits réacteurs nucléaires modulaires*.  
<https://www.connaissancesdesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-nucleaire-smr-petits-reacteurs-modulaires>

Industrial Info Resources (2023, 20 septembre). *Nuclear Power Purchase Agreements Take Shape in the U.S.*  
<https://www.linkedin.com/pulse/nuclear-power-purchase-agreements-take-shape/>

AFCN - Agence fédérale de contrôle nucléaire (2024, 27 mars). *Centrales nucléaires en Belgique*.  
<https://afcn.fgov.be/fr/dossiers/centrales-nucleaires-en-belgique>

Hussein, E. M. (2020, décembre). *Emerging small modular nuclear power reactors: A critical review*.  
<https://doi.org/10.1016/j.physo.2020.100038>

Regen (2020, 7 octobre). *Local flexibility markets guide*.  
<https://www.regen.co.uk/publications/local-flexibility-markets-guide/>