

Figure 1 : Puissance instantanée nécessaire en France sur 1 semaine

### I. Contexte

Dans le monde, la production d'électricité représente un quart des émissions de gaz à effet de serre[1]. Face au réchauffement climatique, il est donc vital de **décarboner** cette production en exploitant des énergies renouvelables (ENR). Mais comme la demande varie fortement – de 60 GW à 80 GW à l'échelle d'une journée en France (Figure 1), et que les ENR sont intermittentes, il reste indispensable d'avoir des **sources pilotables, non carbonées** autant que possible. L'hydroélectrique et le nucléaire répondent bien à ce besoin. Ils assurent en effet la **flexibilité électrique** : celle-ci vise à subvenir aux besoins d'énergie en toutes circonstances, avec une grande **réactivité** (jusqu'à 10s, Figure 1), mais aussi à rendre les sources de production **complémentaires**.

Le but est donc d'**exploiter de manière optimale les énergies renouvelables** et ensuite, les réserves d'énergie pilotable décarbonée de chaque pays, pour aboutir à un mix énergétique décarboné, qui puisse satisfaire la demande à tout moment. Cependant, le développement massif des ENR va **mettre sous pression les filières de production** avec des contraintes géopolitiques, en matériaux etc...  
Il s'agit donc de **réfléchir à l'optimisation de la répartition des types de production**.

### II. Etat des lieux des capacités pilotables décarbonées

Les principales capacités pilotables décarbonées sont les centrales **hydroélectriques** et les centrales **nucléaires**. A l'échelle du globe, on constate de **grandes disparités** dans les capacités installées selon les pays.

Pour tracer ces cartes, nous avons récupéré les données sur **International Hydropower Association**[2] et **l'IAEA**[3], avant d'utiliser deux modules de python : **dataframe** et **geopandas**.

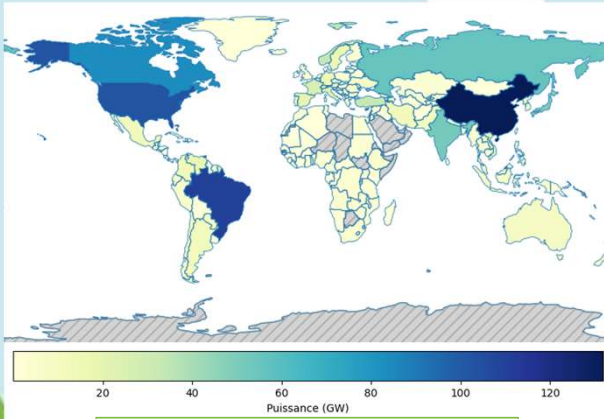


Figure 2 : carte de la puissance hydroélectrique installée en 2023

#### II. 1. Capacités hydrauliques installées

L'implantation de barrages dépend de nombreux facteurs, le premier étant la **contrainte géographique**, puisque l'énergie hydraulique nécessite du relief. Ensuite, **l'environnement, la démographie de la zone, le coût des investissements** entrent en compte. Grâce à cette carte (Figure 2), on constate que les pays qui exploitent le plus leur potentiel hydraulique sont la Chine, le Brésil, les Etats-Unis et le Canada.

Néanmoins, on parle ici de **puissance installée**, alors que les installations électriques ne tournent pas en permanence. Donc on s'intéresse aussi au **facteur de charge** (formule ci-dessus). Ce dernier fournit une idée de combien de temps l'installation électrique fonctionne effectivement.

$$CF = \frac{\int_{T_{1an}} P_{instantanée}(t) dt}{P_{nominale} \cdot T_{1an}}$$

#### II. 2. Capacités nucléaires installées

De même, les capacités nucléaires installées varient considérablement dans le monde (Figure 3). De nombreux pays ne possèdent aucune tranche nucléaire, tandis que les Etats-Unis en disposent de 100 GW de puissance.

Contrairement à l'hydraulique, les raisons de ces disparités sont davantage **historiques et géopolitiques** : le développement de l'énergie nucléaire pourrait poser un risque, si elle est utilisée à des fins militaires.

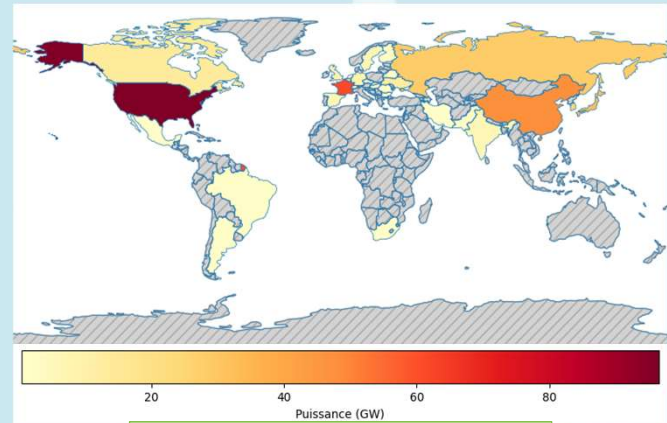


Figure 3 : carte de la puissance nucléaire installée en 2023

### III. Optimisation des mixes électriques

Pour décarboner la production électrique, il convient de chercher à trouver la **répartition idéale** entre hydraulique, nucléaire et énergies intermittentes renouvelables. Dans ce contexte, on se demande **comment répartir de manière optimale ces énergies renouvelables**. Cette répartition **dépend des capacités pilotables décarbonées disponibles** dans chaque pays, des ressources renouvelables et de la consommation. Connaissant toutes ces contraintes, nous avons utilisé un **programme, fourni par J. Duval pour optimiser le mix énergétique** dans un trio de pays donnés. Il s'agit d'un code programmation linéaire qui permet de minimiser l'utilisation de pilotable carboné sur 1 an et renvoie des mixes électriques optimaux sous contrainte de ressources, par pays.

#### III. 1. Hypothèses retenues pour le programme

L'optimisation nécessite le **calcul d'un budget matière pour chaque pays** et pour cela, nous utilisons la formule ci-contre. Dans celle-ci, nous avons besoin des **intensités carbone** de chaque matériau (nous choisissons les 5 principaux utilisés : béton, acier, aluminium, cuivre et plastique) qui représente la **masse de CO2 émis par kW pour un type d'ENR installé**.

$$\text{Budget}_{\text{matériau/pays}} = \left( \text{Budget Carbone Total} \times \frac{\text{Population}_{\text{pays}}}{\text{Population}_{\text{mondiale}}} \times \text{Part Énergie dans les Émissions Globales} \right) \times \left( \frac{\text{Proportion}_{\text{matériau}}}{\text{Intensité Carbone}_{\text{matériau}}} \right)$$

#### III. 3. Analyse graphique

- Budget **large** : On peut répondre à la production avec **100% d'ENR** et on écrête beaucoup (Figure 5).
- Budget **limitant** : les **équilibres sont modifiés** car on contraint le système qui est forcé (Figure 6) de trouver la répartition optimale pour laisser le moins de pilotable carboné dans l'ensemble des mixes.
- En Egypte, il reste très intéressant de conserver l'éolien en source d'énergie majeure car le **facteur de charge est plus important** (Figure 4).

#### III. 4. Interprétation globale

Finalement, l'optimisation permet d'améliorer le modèle de production d'électricité verte en **répartissant "intelligemment"** le maximum de sources d'ENR. La répartition **change avec le budget de façon singulière**, avec notamment l'exemple de l'Egypte pour qui la division du budget n'a pas autant de conséquences sur les ENR. Cependant, la diminution du budget matière force la plupart des pays à **recourir à d'autres moyens** de productions que les ENR (Figures 5 et 6), notamment le pilotable décarboné et parfois même le pilotable carboné (en l'absence d'alternative). Mais ce n'est **pas l'unique contrainte** à prendre en compte (facteur de charge, climat, consommation).

### IV. Conclusion

L'optimisation énergétique est un **problème complexe et multifactoriel**, qui nécessite de trouver des compromis entre **efficacité énergétique et impact environnemental**.

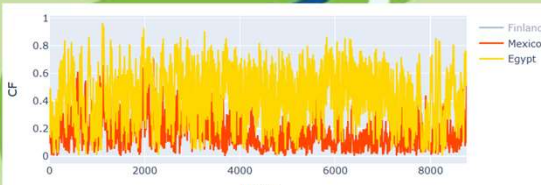
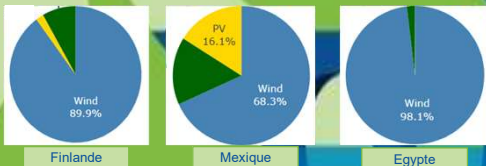


Figure 4 : Facteur de charge de l'éolien sur une année pour 2 des 3 pays sélectionnés

#### III. 2. Choix d'étude

Nous avons choisi d'étudier 3 pays très **différents** sur les plans économiques, démographiques et géographiques, en particulier quant aux conditions **météorologiques** et à la consommation **énergétique**. L'optimisation nous a fourni, en faisant **varier la contrainte** sur le budget, les répartitions suivantes :

Budget/100



Budget/1000

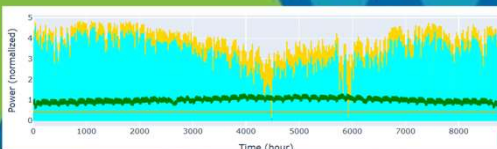
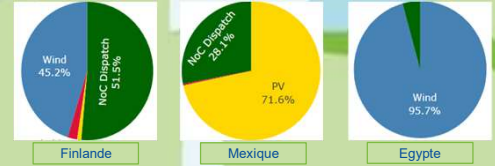


Figure 5 : Puissance normalisée pour le Mexique à budget/100

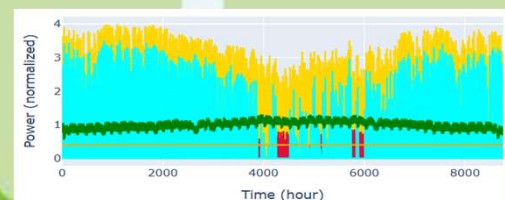


Figure 6 : Puissance normalisée pour le Mexique à budget/1000

Sources :  
[1] : Global CO2 emissions by sector (IEA 2020)  
[2] : 2024 World Hydropower Outlook  
[3] : IAEA Nuclear Power Reactors in the World, 2021

