



# Vers le tout électrique avec moins de fossiles et de nucléaire : progrès ou régression ?

Pierre-L. Kunsch

Dr. en Sciences ETH Zürich

Professeur honoraire de l'École Polytechnique de l'ULB et de la Solvay Business School VUB

Bernard Durand, TRIBUNE le 24/07/2023

*L'électricité éolienne ne sert à rien...*

**Il s'agit d'un jeu à somme constante qui n'augmente pas d'un iota la production totale d'électricité ! ...**

Construire plus d'éolien ... serait une monumentale erreur, car cela ne servirait à rien d'autre qu'à faire beaucoup augmenter les émissions de CO2 et le coût de production de notre électricité !

**EXPLICATIONS ?**

# Bernard Durand Lettre ouverte juillet 2023

auteur de « Un vent de folie » (Les Impertinents 2020)

... A consommation électrique donnée l'éolien et le solaire PV, du fait de l'énorme et incontrôlable variabilité de la puissance électrique qu'ils délivrent, doivent pour être utilisables être impérativement associés sur les réseaux électriques à des centrales dites pilotables (nucléaires, hydroélectriques, à combustibles fossiles...), ... pour pouvoir faire face à l'absence de vent et ou de soleil. Mais ces centrales sont alors forcées de faire varier leur puissance de façon tout aussi variable et aléatoire, pour ajuster la production totale d'électricité à la consommation et doivent réduire ainsi leur production de la quantité d'électricité que l'éolien et le solaire PV produisent.

**Il s'agit donc d'un jeu à somme constante qui n'augmente pas d'un iota la production totale d'électricité ! ...**

# PREUVES EN DEUX PARTIES ?

## Première partie

*Une comparaison production/consommation aux premiers semestres de 2022/2023*

*Basée entièrement sur la loi de la conservation de l'énergie*

Données ENTSO-E (opérateurs de transport eu, Elia en BE, RTE en FR)  
<https://transparency.entsoe.eu/generation/r2/actualGenerationPerProductionType/show>

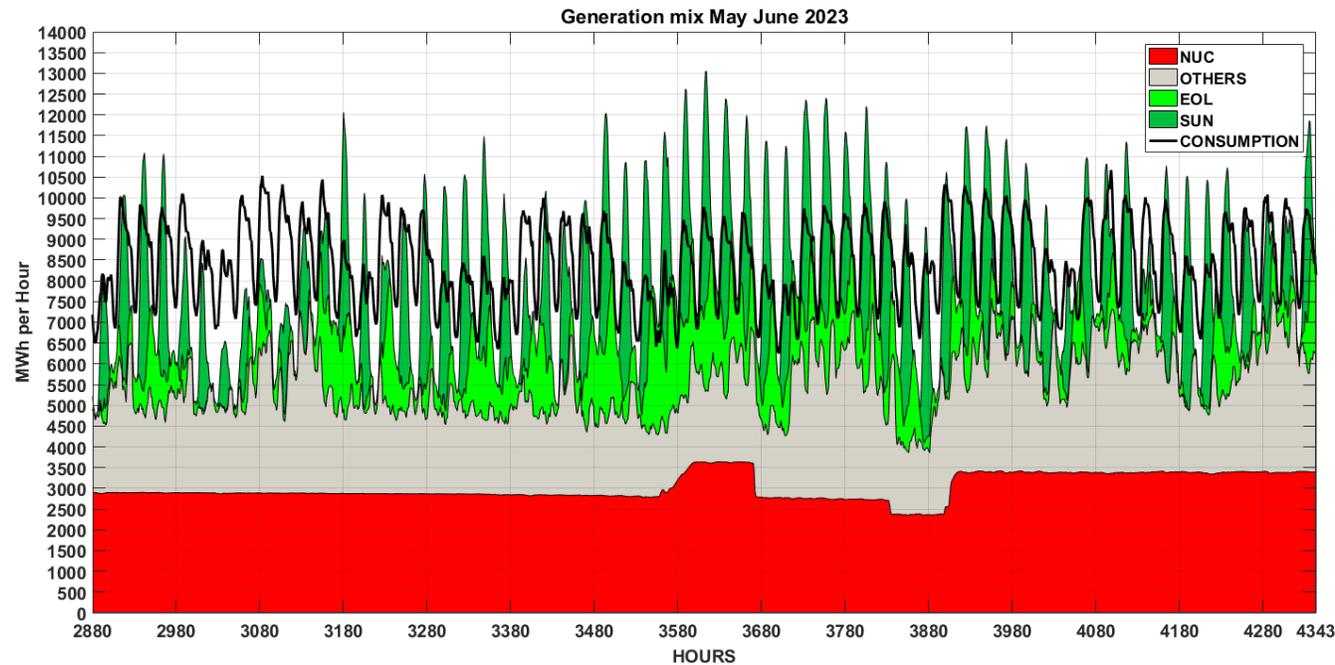
## Deuxième partie

*Simulations de l'abandon progressif des fossiles et du nucléaire avec 7 scénarios*

# Première partie

**Une comparaison entre les premiers semestres des années  
2022 et 2023**

# Une vue 'habituelle' de la production en mai & juin 2023 (extrait 1er semestre)



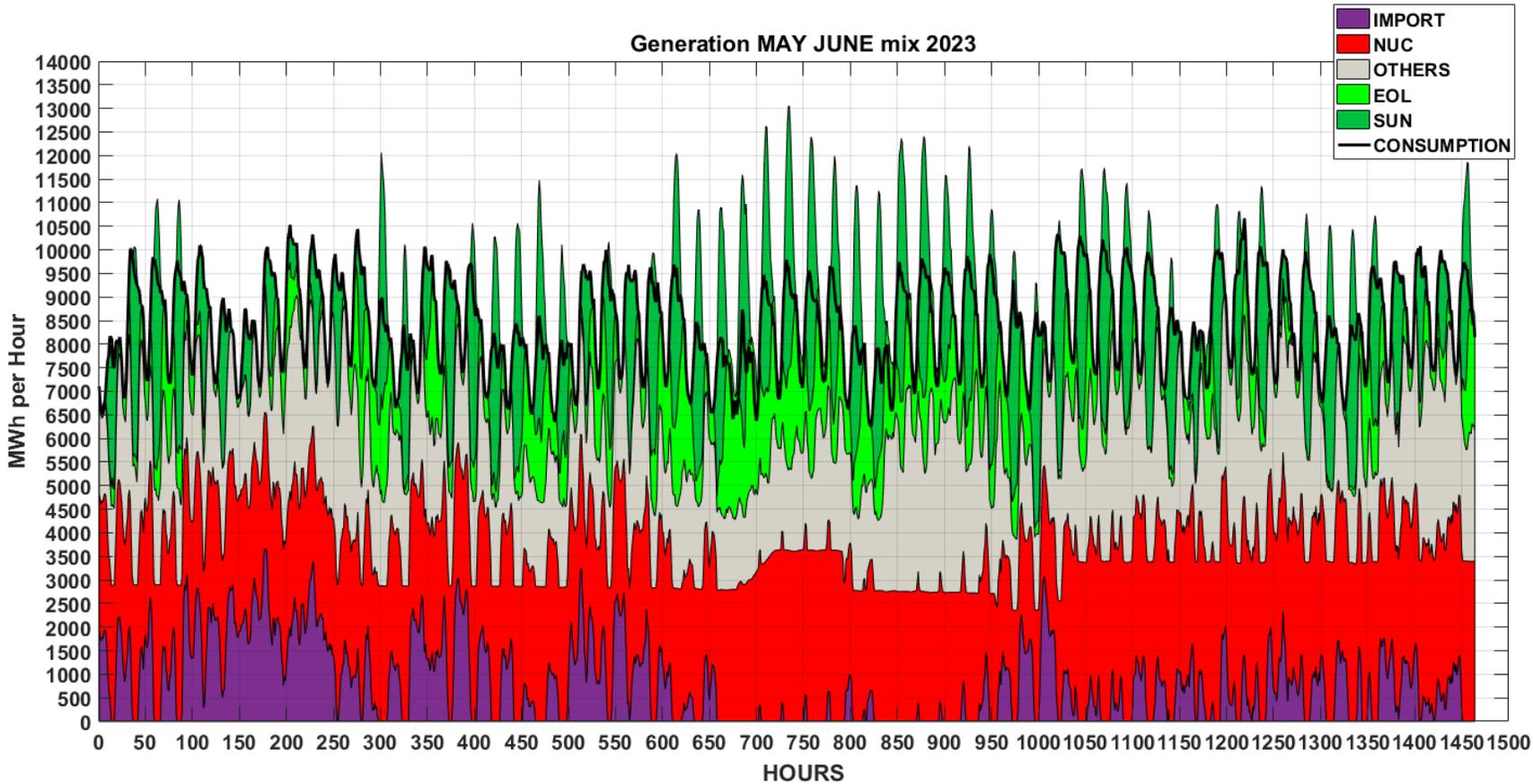
On voit :

- la production nucléaire est bridée parce que les *énergies renouvelables intermittentes (ENRi)* ont priorité sur le réseau
- les 'blancs' indiquent le manque de production domestique
- la courbe noire indique la consommation (demande)
- les pointes ENRi, surtout solaires, créent des excédents au-delà de la demande

En abscisse les heures depuis le 31 avril à minuit au 30 juin à minuit de la 2880<sup>e</sup> heure à la 4343<sup>e</sup> heure

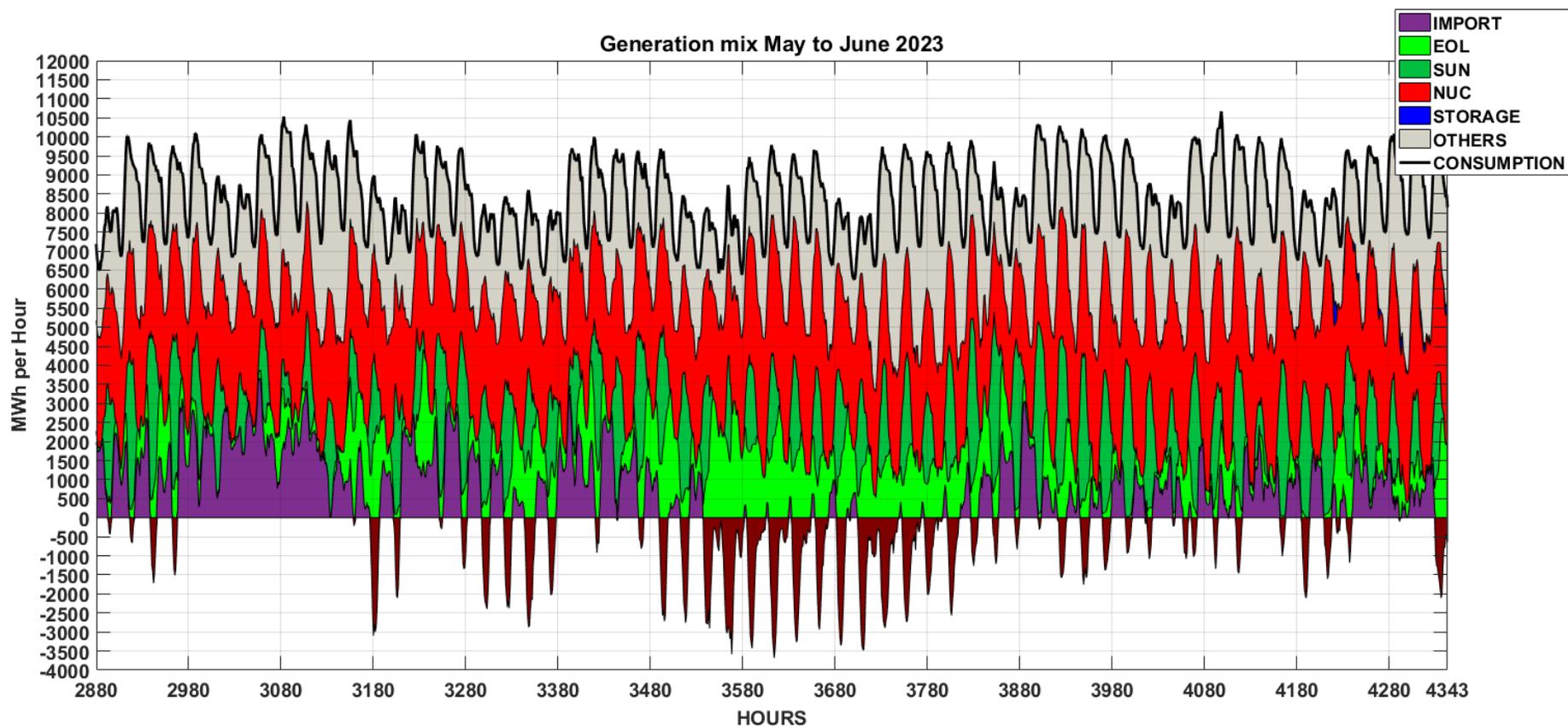
En ordonnées les productions d'énergie par heure en MWh par heure

# Vue Production + Manques comblés par des importations (en violet)



Les 'blancs' sont comblés par des importations venant des pays Voisins, du stockage, des effacements de demande, ou du DSM

## Importations hors stockage, Excédents hors STEP, stockage STEP

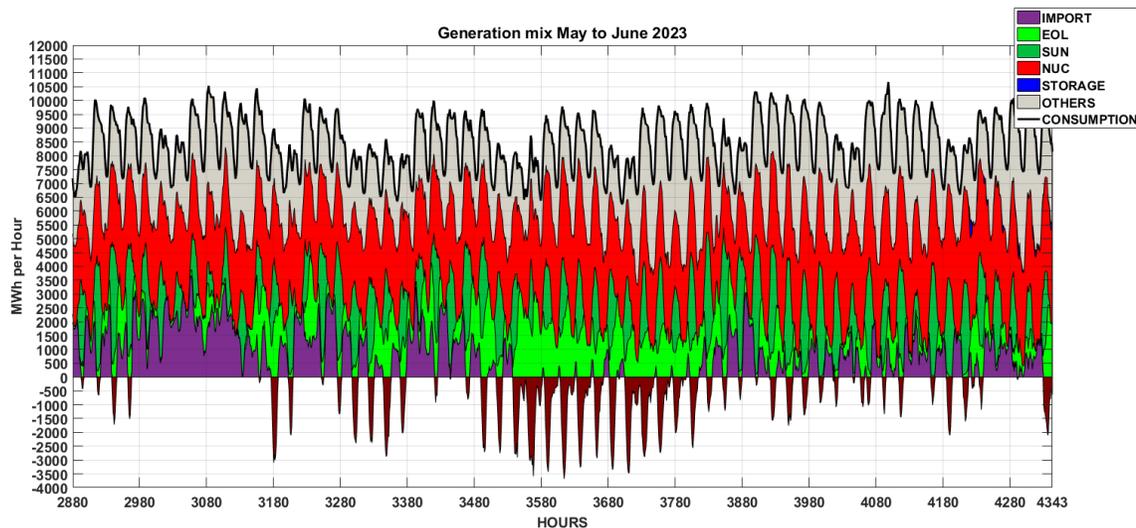
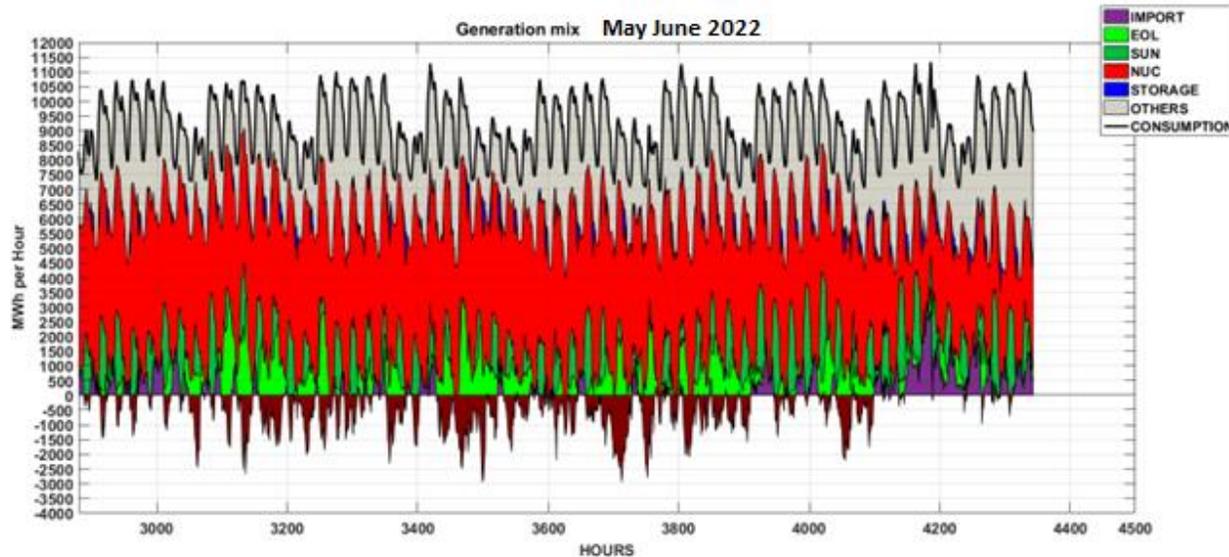


Les excédents apparaissent en négatif : ils sont diminués du STEP pompage (stockage hydraulique)  
Les importations/effacements apparaissent en violet : les manques sont diminués du STEP turbinage  
Les pertes sont de 28% pour le stockage STEP

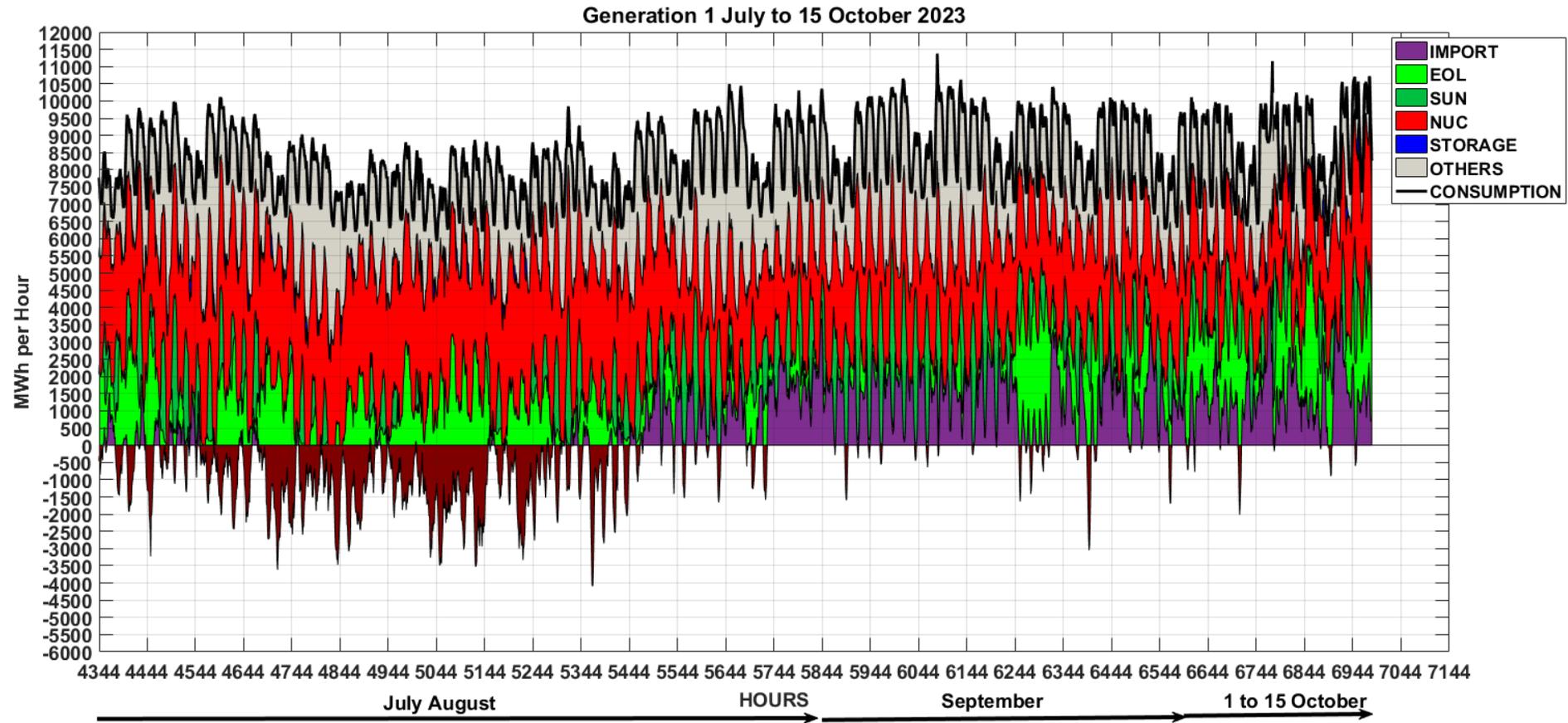
## Une comparaison des premiers semestres 2022 et 2023 (extraits mai – juin)

Entre les deux périodes :

- on a perdu 2 GW nucléaire
- on a gagné des capacités ENRi, surtout PV
- MAIS la production, la consommation, les puissances de pointe diminuent avec la diminution des puissances pilotables (-2 GW), et donc aussi les excédents et les exportations
- les importations explosent
- les excédents diminuent : ils sont soit exportés, soit perdus, soit utilisés pour le stockage STEP
- la production gaz naturel et des autres sources pilotables assurent l'équilibre production=consommation à chaque instant et font que les émissions CO2 augmentent
- le stockage STEP disponible dans le plat pays n'a qu'un effet marginal à peine visible en mai-juin



# ÉTÉ 2023



# SYNTHÈSE CHIFFRÉE

MIX en TWh sur 6 mois

% Consommation en 2022=100%

Janvier à Juin	2022	2023	Difference	2022	2023
<b>PRODUCTION</b>	<b>44,47</b>	<b>40,12</b>	<b>-9,8%</b>	<b>105,7%</b>	<b>95,3%</b>
<b>NUCLÉAIRE</b>	<b>22,00</b>	<b>15,84</b>	<b>-28,0%</b>	<b>52,3%</b>	<b>37,6%</b>
<b>AUTRES PILOTABLES</b>	<b>13,59</b>	<b>13,77</b>	<b>1,4%</b>	<b>32,3%</b>	<b>32,7%</b>
PHOTOVOLTAÏQUE	3,36	3,90	16,1%	8,0%	9,3%
ÉOLIEN	5,53	6,60	19,5%	13,1%	15,7%
<b>ENRI</b>	<b>8,88</b>	<b>10,50</b>	<b>18,2%</b>	<b>21,1%</b>	<b>24,9%</b>
<b>EXPORTÉ OU STOCKÉ</b>					
<b>EXPORT</b>	<b>2,97</b>	<b>2,23</b>	<b>-25,0%</b>	<b>7,1%</b>	<b>5,3%</b>
STEP_pompe	0,87	0,38	-56,2%	2,1%	0,9%
<b>CONSOMMATION</b>	<b>42,08</b>	<b>40,09</b>	<b>-4,7%</b>	<b>100,0%</b>	<b>95,3%</b>
<b>NUCLÉAIRE utile</b>	<b>21,67</b>	<b>15,40</b>	<b>-28,9%</b>	<b>51,5%</b>	<b>36,6%</b>
<b>AUTRES PILOTABLES utiles</b>	<b>13,59</b>	<b>13,77</b>	<b>1,4%</b>	<b>32,3%</b>	<b>32,7%</b>
PHOTOVOLTAÏQUE utile	1,84	2,86	55,0%	4,4%	6,8%
ÉOLIEN utile	3,53	5,47	55,3%	8,4%	13,0%
<b>ENRI utiles</b>	<b>5,37</b>	<b>8,33</b>	<b>55,2%</b>	<b>12,8%</b>	<b>19,8%</b>
<b>IMPORT</b>	<b>0,82</b>	<b>2,31</b>	<b>183,0%</b>	<b>1,9%</b>	<b>5,5%</b>
<b>STEP_turbine</b>	<b>0,64</b>	<b>0,27</b>	<b>-57,5%</b>	<b>1,5%</b>	<b>0,7%</b>
<b>rendement STEP</b>	<b>74%</b>	<b>72%</b>	<b>-2,1%</b>		

Émissions CO2	g CO2/kWh*	2022	2023
Nucléaire	12	264	190
Gaz naturel	490	4259	4469
Autres fossiles	650	1834	1968
Hydro	24	2	3
Biomasse & Waste	230	463	349
éoliennes mer & Terre	13	72	86
Photovoltaïque	36	121	140
Données GIEC*			
TOTAL ktCO2		7014	7206
Production TWh		44,47	40
gCO2/kWh		158	180

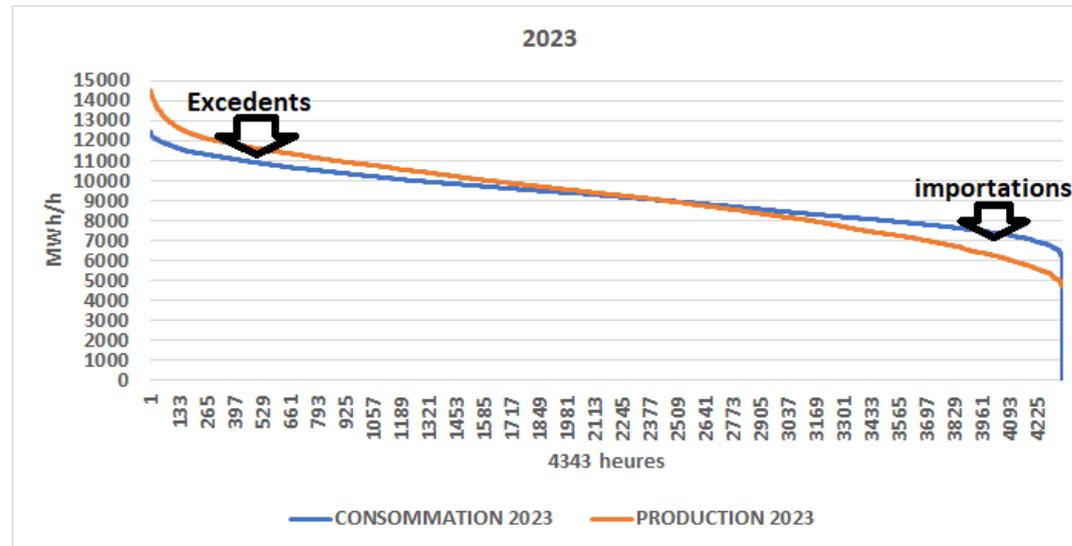
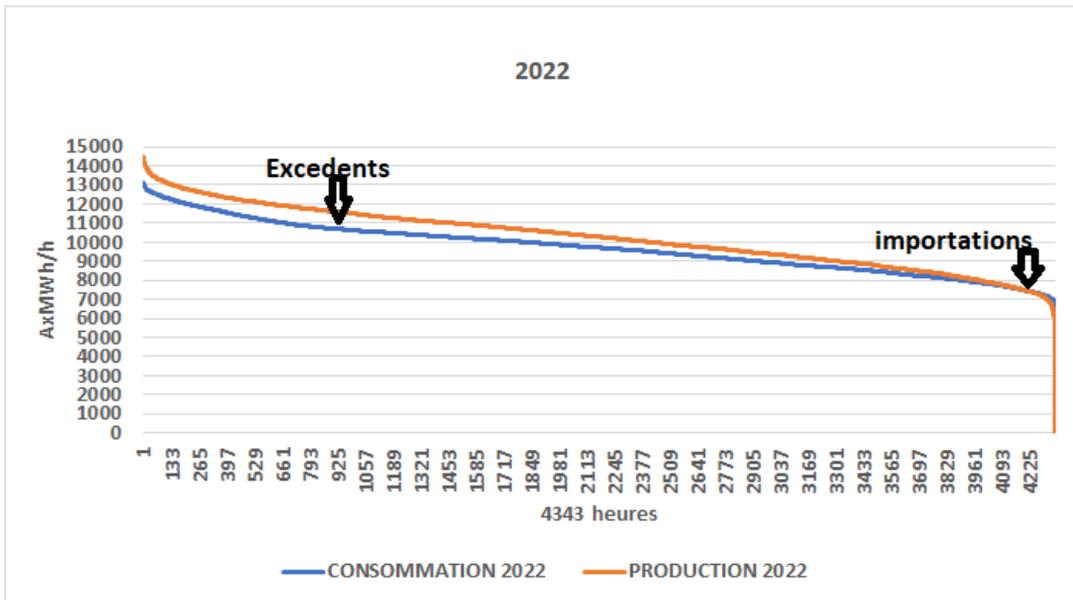
+ 14%

**LA LOI DE CONSERVATION DE L'ÉNERGIE DOIT ÊTRE RESPECTÉE :**

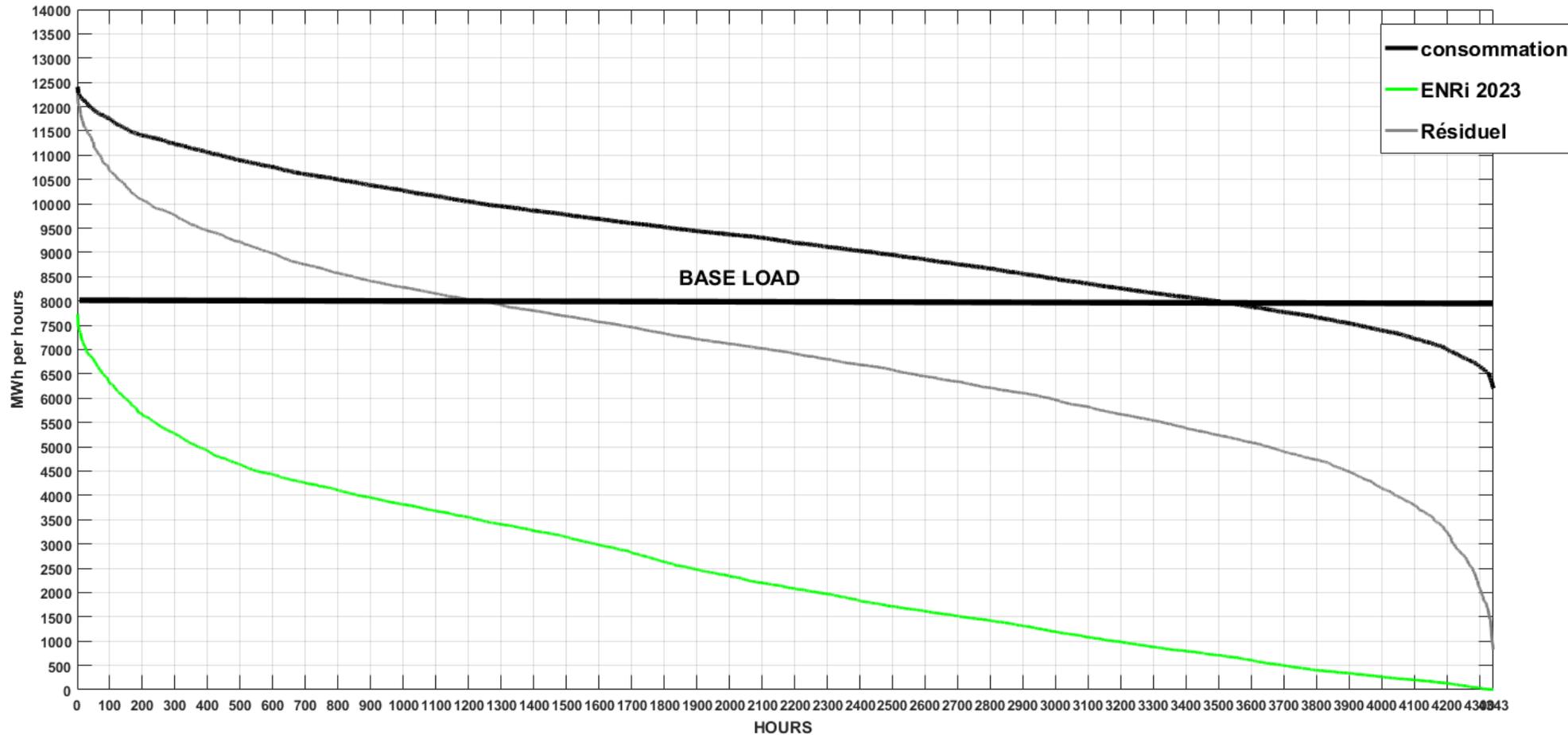
La part utile (utilisée directement hors excédents) de la production doit rester à tout moment égale à la consommation pour assurer l'équilibre du réseau

$CONSOMMATION = PRODUCTION - (EXPORT + STEP\_pompe) + IMPORT + STEP\_turbine$   
 $= NUC\ utile + AUTRES\ PILOTABLES\ utiles + ENRI\ utiles + IMPORT + STEP\ turbine$   
 $PRODUCTION = NUCLÉAIRE + AUTRES\ PILOTABLES + ENRI$   
 $EXPORT = PROD - (NUC\ utile + AUTRES\ utiles + ENRI\ utiles) - STEP\_pompe$   
 $AUTRES\ PILOTABLES = Biomasse + Waste + Hydro\ fil\ de\ l'eau + Gaz\ naturel + autres\ fossiles$   
 $ENRI = Photovoltaïque + Éolien$   
 $STEP = Station\ de\ transfert\ d'énergie\ par\ pompage$

## Courbes de consommation Courbes de production



# Comment piloter pour l'équilibre Production = Consommation (chaque sec)?

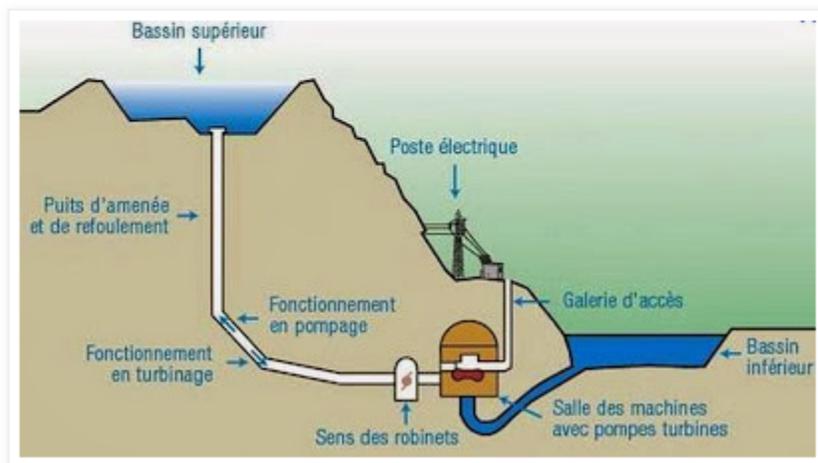


# Qu'apporte le stockage pour mieux répartir la production?

## Principe

Le principe est fort simple : sur un site géographique approprié comportant un lac inférieur et un lac supérieur ayant une grande différence d'altitude, on établit au niveau du lac inférieur une station réversible reliée au lac supérieur par une conduite forcée (tuyau de gros diamètre résistant à la pression). Cette station comporte un ou plusieurs groupes constitués chacun d'une machine électrique synchrone couplée à une turbine hydraulique, toutes deux réversibles, pouvant fonctionner de deux manières :

- en **production**, l'eau descend par la conduite forcée et fait tourner la turbine qui entraîne la machine. Celle-ci est alors un alternateur produisant l'énergie électrique écoulee par le réseau de transport.
- en **pompage**, la machine utilisée en moteur synchrone consomme l'énergie électrique provenant du réseau et entraîne la turbine qui refoule l'eau du lac inférieur vers le lac supérieur via la conduite forcée.



lundi 25 novembre 2013

## STEP - Station de Transfert d'Énergie par pompage

### STEPs de montagne

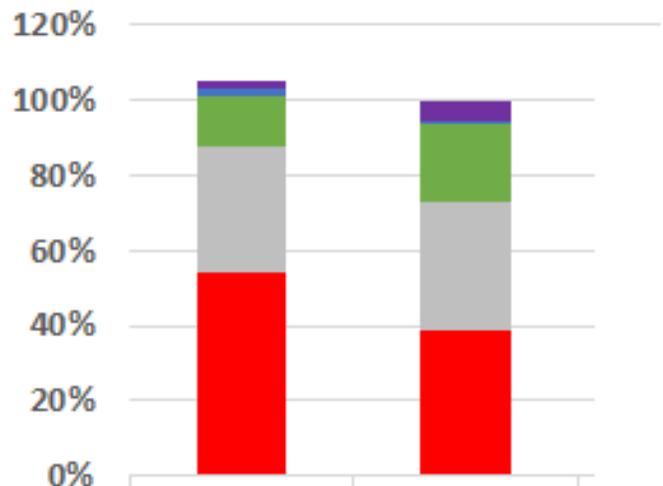
### 8-e France STEP

***Le pompage turbinage avec les STEP est la seule solution réaliste pour le stockage à grande échelle des excédents  
Son potentiel est limité en Belgique : puissance pompage 1,3 GW  
Capacité de stockage environ 6,5 GWh (5 h) rendement global 72%***

*Le plus grand système de batterie au monde (Cf USA) représente une puissance de 0,75 GW pour une capacité de stockage de 4 h, soit 3 GWh. Le rendement global charge-décharge ne devrait pas dépasser 80%, sans compter les pertes de stockage dans le temps*

# LES DEUX FACES DE LA MÉDAILLE CONSOMMATION & PRODUCTION

## Consommation mix 40,1 TWh

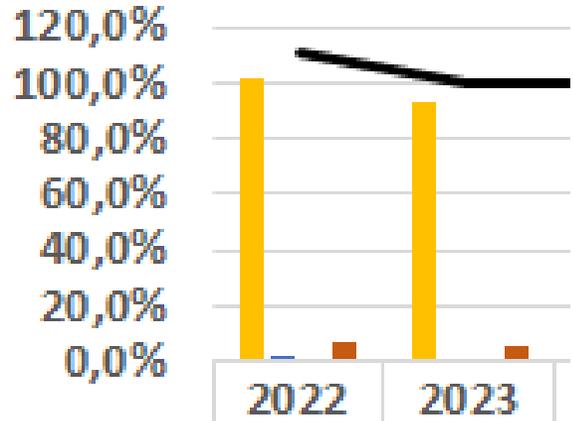


Importations nettes	2%	6%
stockage	2%	1%
ENRi utiles	13%	21%
Autres pilotables utiles	34%	34%
Nucléaire utile	54%	38%

**105%**      **100%**

**100%=40,09 TWh consommés**

## Productions 2022 & 2023



production directe	101,3%	93,5%
stockage	1,6%	0,7%
pertes stockage	0,6%	0,3%
Exportations nettes	7,4%	5,6%
<b>Total production</b>	<b>110,8%</b>	<b>100,0%</b>

**EXCÉDENTS**

**100%=40,12 TWh produits**

Production directe

# Enseignements de la comparaison 2022/2023

## **jusqu'en 2022 : effet quasi nul des ENRi sur les réductions d'émissions de CO2**

- avec des capacités pilotables supérieures à 14 GW on pouvait couvrir en permanence la consommation d'électricité dont le pic se situe en général en février (la valeur historique de 13,7 GW sert de référence). La production ENRi qui a priorité sur le réseau se fait d'abord au détriment du nucléaire que l'on bride souvent (surtout en été du fait des pics PV) pour éviter des excédents trop importants (possibilités d'exportations limitées vers les pays voisins, prix négatifs). Les importations nettes sont faibles.
- Du fait que l'on bride le nucléaire, non émetteur, les émissions de CO2 ne sont pas réduites par rapport à la situation qu'on aurait avec peu d'ENRi et un facteur de charge nucléaire non bridé proche de 90%
- Dans ce contexte de puissances pilotables suffisantes, il n'y avait aucun problème d'assurer la charge résiduelle par le gaz dont le facteur de charge moyen était bas, autour de 40%. Avec beaucoup d'ENRi, ceci posait le problème d'utilisation non optimale du gaz avec usage accru de combustible et davantage d'émissions NOX

**Bernard Durand a raison : les ENRi ne servent à rien sur les réseaux en Belgique !**

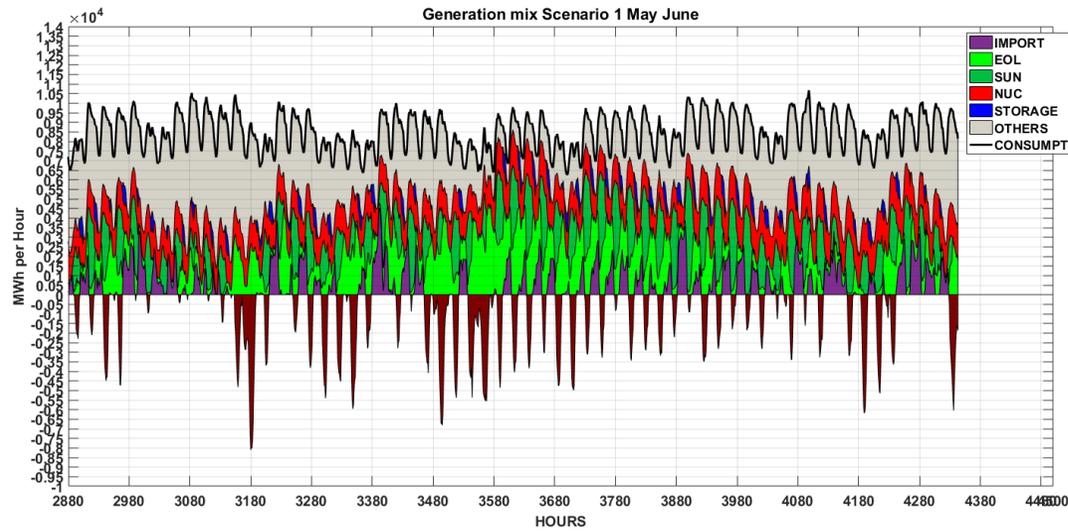
# Deuxième partie

**Simulations de l'abandon des fossiles et du nucléaire**

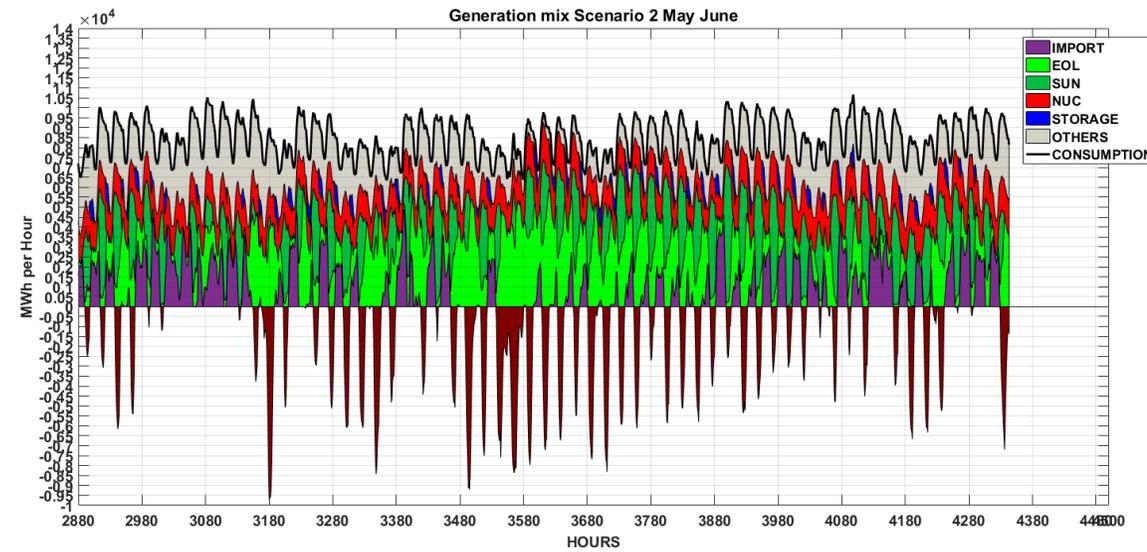
**7 scénarios**

SCENARIOS	Nucléaire	PILOTABLES AUTRES	ENRi	STOCKAGE
1	50% TWh 2023	GW 2023	1,5xTWh 2023	STEP 2023
2	50% TWh 2023	50% GW 2023	2xTWh 2023	idem

Scénario 1 pour mai juin



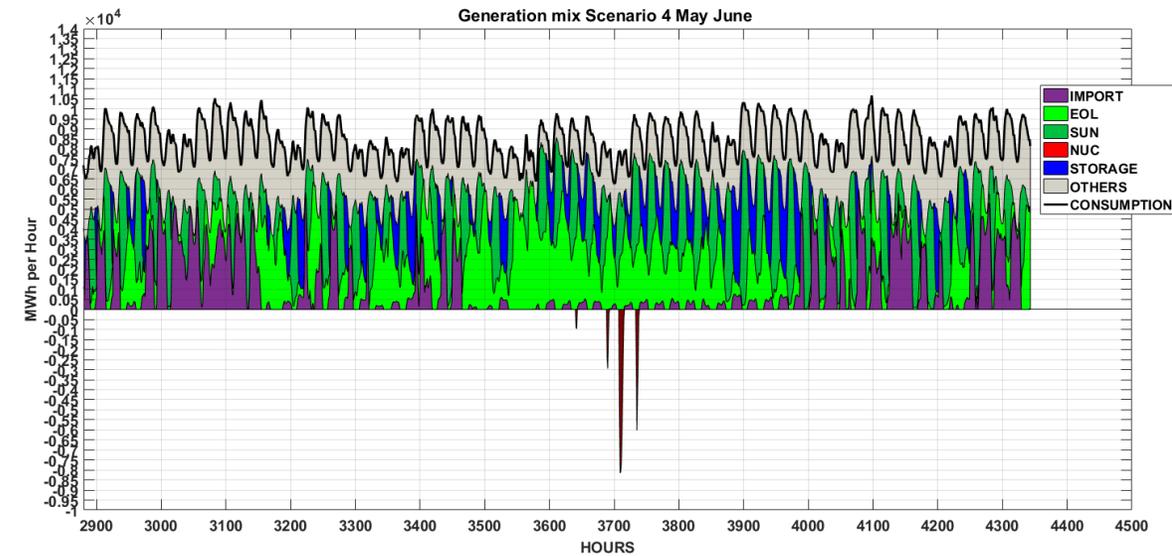
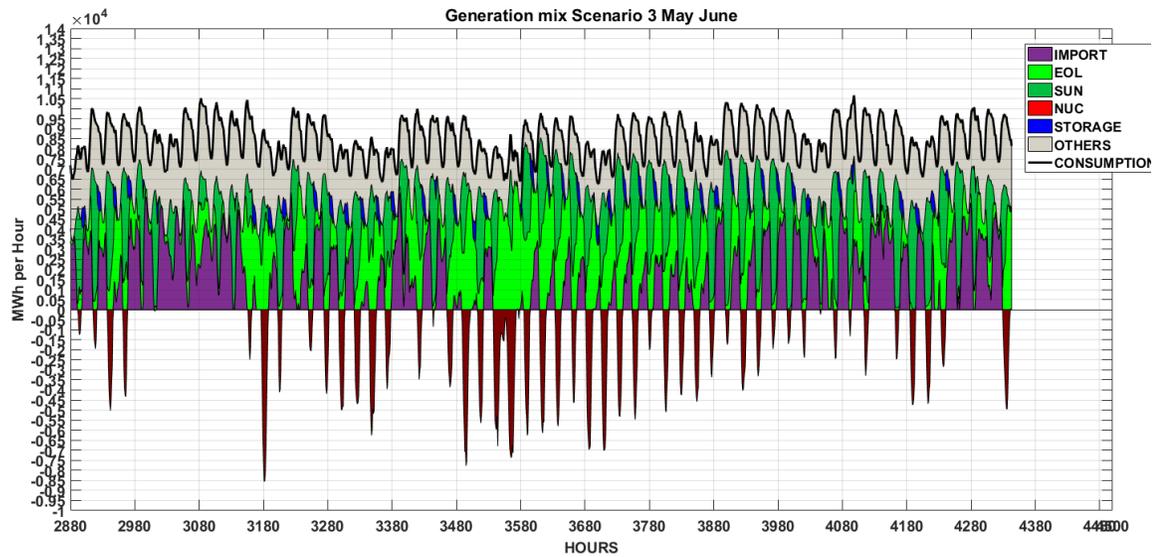
Scénario 2 pour mai juin



SCENARIOS	Nucléaire	PILOTABLES AUTRES	ENRi	STOCKAGE
3	0 TWh	50% GW 2023	2xTWh 2023	Idem
4	0 TWh	50% GW 2023	2xTWh 2023	Puissance excédentx24h

### Scénario 3 STEP existants

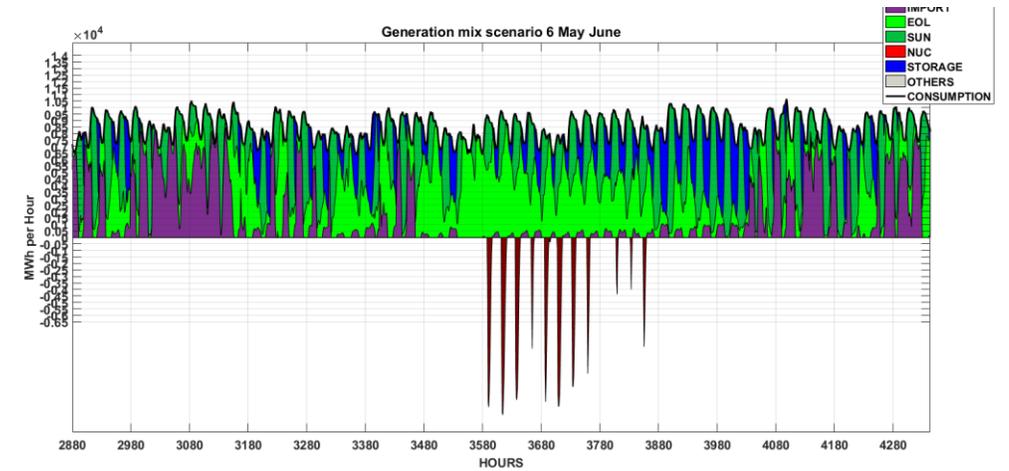
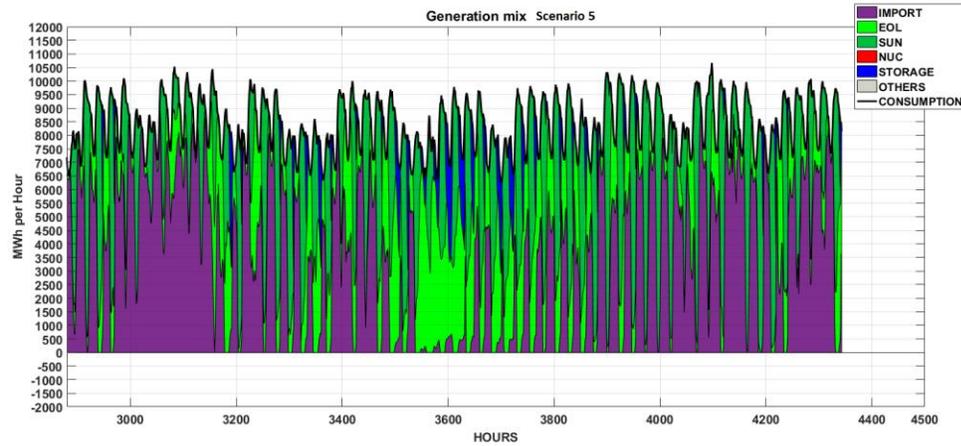
### Scénario 4 STEP optimisé



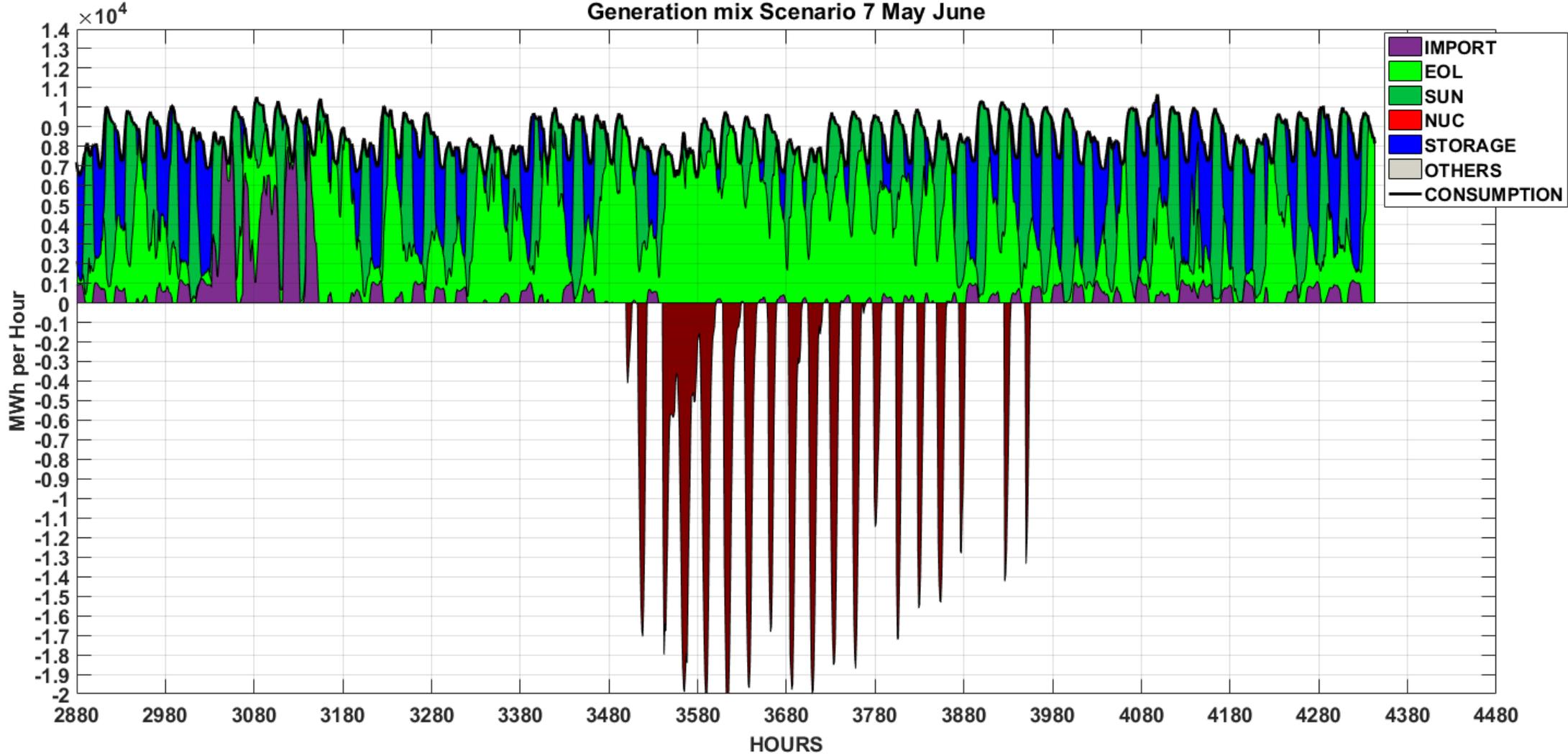
SCENARIOS	Nucléaire	PILOTABLES AUTRES	ENRi	STOCKAGE
5	0 TWh	0 TWh	2xTWh 2023	Puissance Excédentx24h
6	0 TWh	0 TWh	3xTWh 2023	Idem
7	0 TWh	0 TWh	4xTWh 2023	idem

Scénario 5 2xENRi 2023

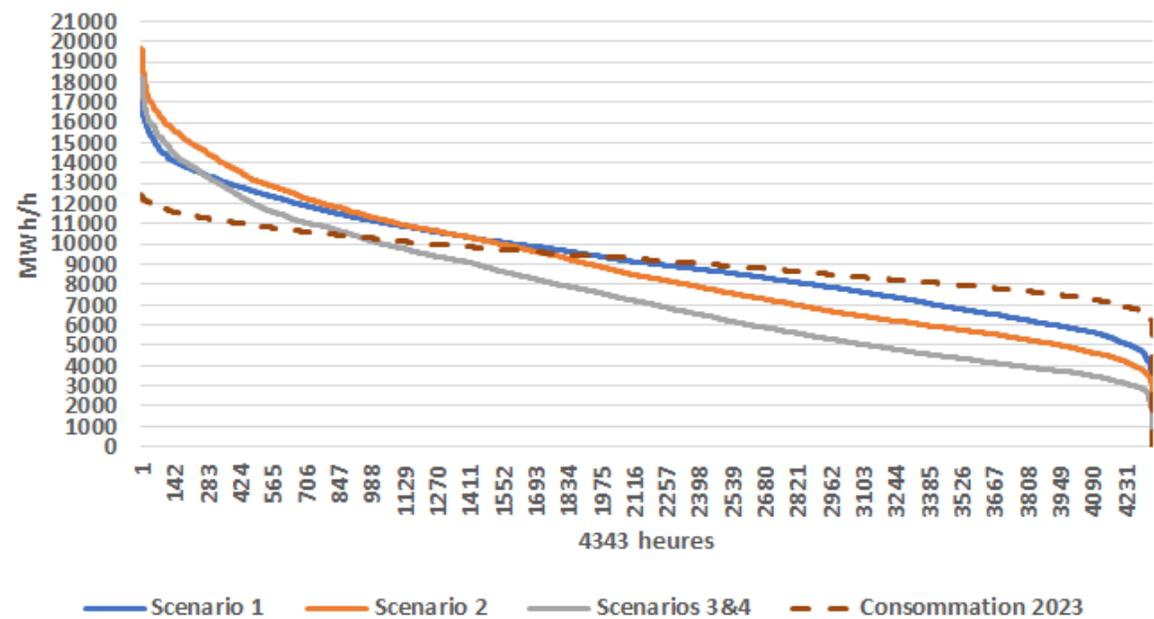
Scénario 6 3xENRi 2023



# Scénario 7 4xENRi 2023

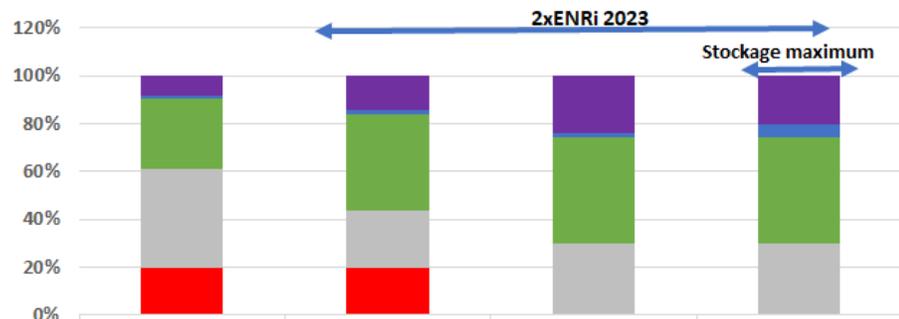


Productions avec pilotables



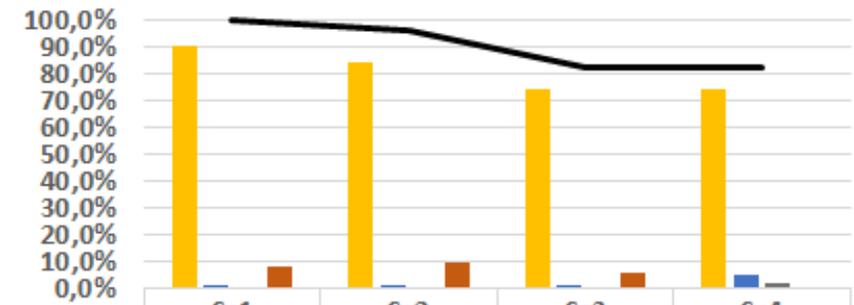
SCENARIOS	Nucléaire	PILOTABLES AUTRES	ENri	STOCKAGE
1	50% TWh 2023	GW 2023	1,5xTWh 2023	STEP 2023
2	50% TWh 2023	50% GW 2023	2xTWh 2023	idem
3	0 TWh	50% GW 2023	2xTWh 2023	Idem
4	0 TWh	50% GW 2023	2xTWh 2023	Puissance excédentx24h

### Consommation mix 40,1 TWh Janvier à Juin 2023

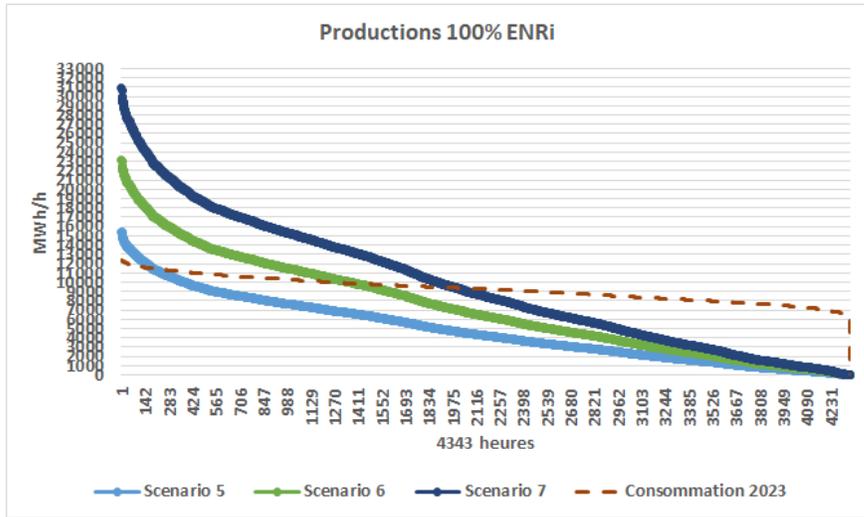


	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
■ Importations nettes	8%	15%	24%	20%
■ stockage	1%	1%	1%	5%
■ ENRi utiles	29%	40%	45%	45%
■ Autres pilotables utiles	41%	24%	30%	30%
■ Nucléaire utile	20%	20%	0%	0%

### Production 100%=40,1 TWh en 2023

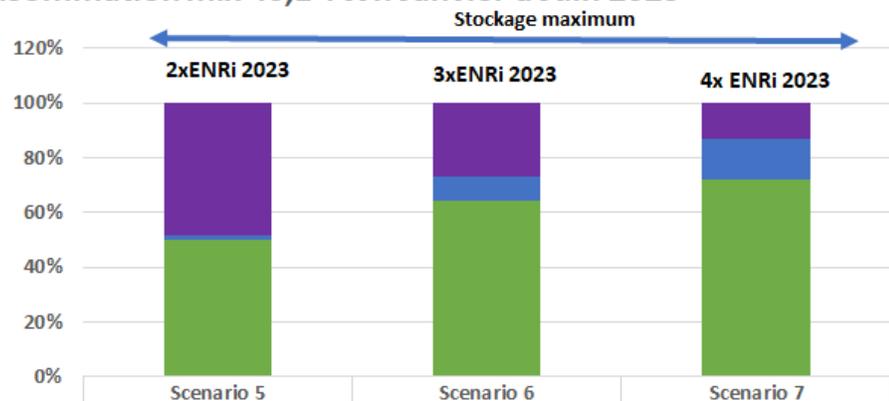


	Sc1	Sc2	Sc3	Sc4
■ production directe	90,2%	84,0%	74,6%	74,6%
■ stockage	1,5%	1,4%	1,3%	5,4%
■ pertes stockage	0,6%	0,6%	0,5%	2,2%
■ Exportations nettes	7,9%	10,1%	5,9%	0,2%
— Total production	100,2%	96,1%	82,2%	82,2%



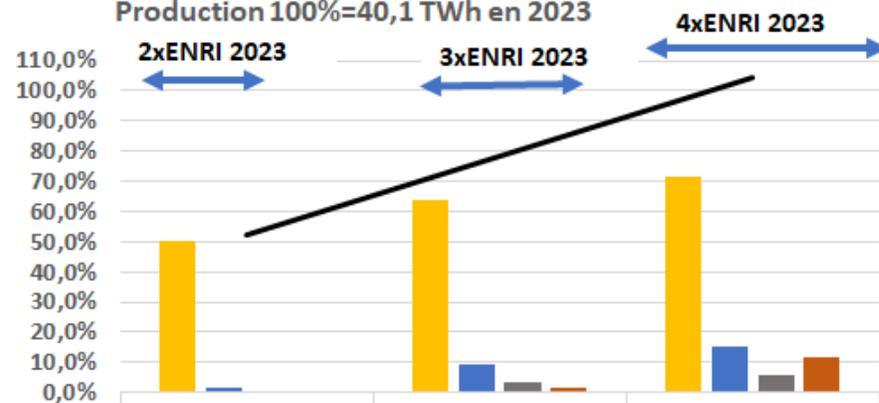
SCENARIOS	Nucléaire	PILOTABLES AUTRES	ENRi	STOCKAGE
5	0 TWh	0 TWh	2xTWh 2023	Puissance Excédentx24h
6	0 TWh	0 TWh	3xTWh 2023	Idem
7	0 TWh	0 TWh	4xTWh 2023	idem

### Consommation mix 40,1 TWh Janvier à Juin 2023



- Importations nettes
- stockage
- ENRi utiles
- Autres pilotables utiles
- Nucléaire utile

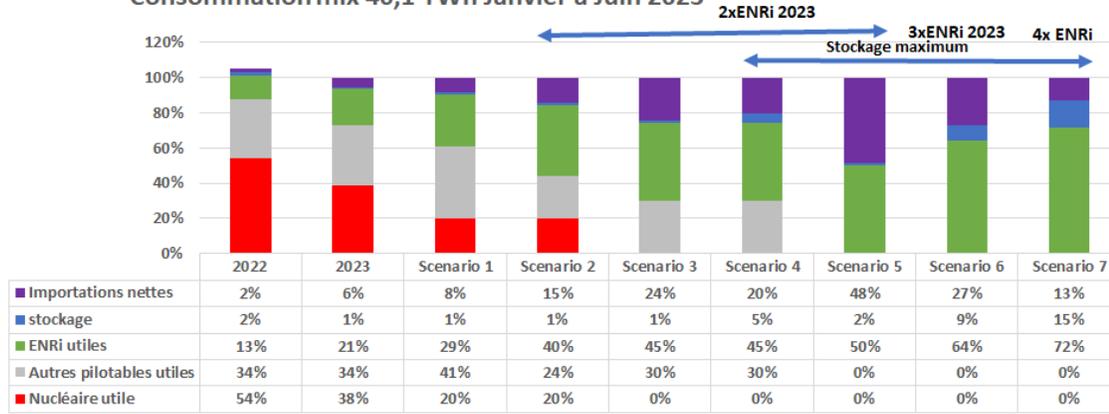
### Production 100%=40,1 TWh en 2023



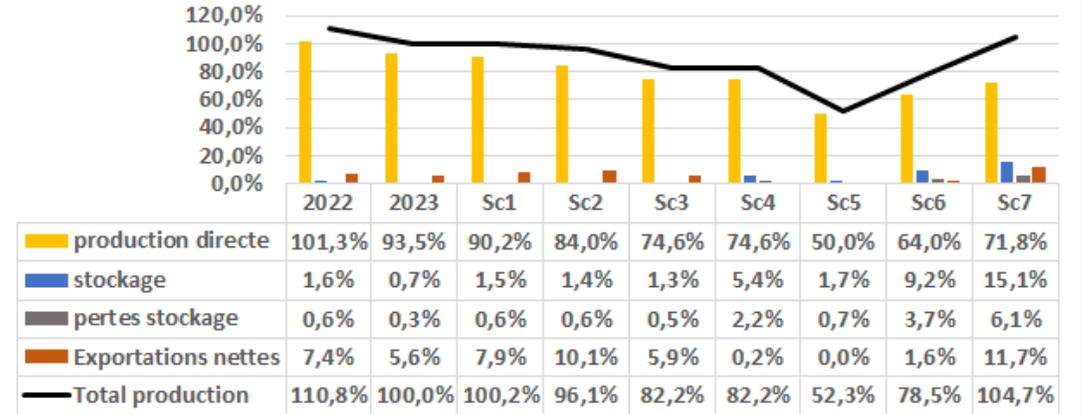
- production directe
- stockage
- pertes stockage
- Exportations nettes
- Total production

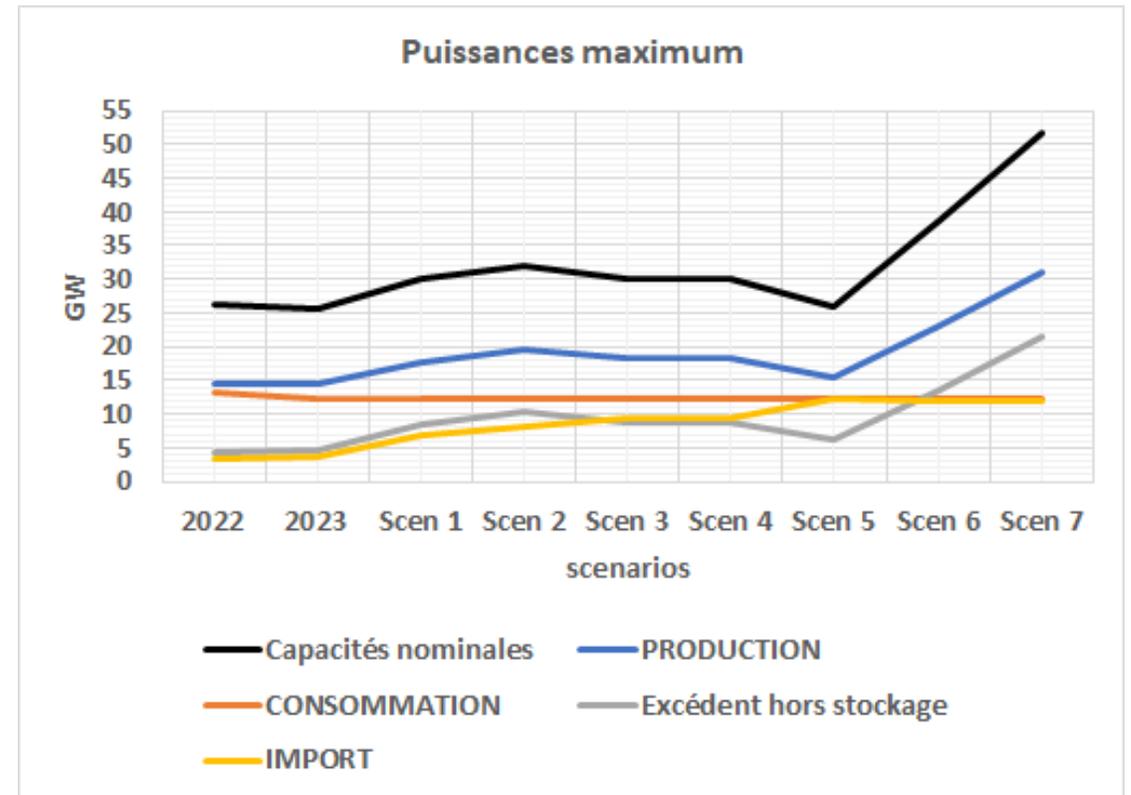
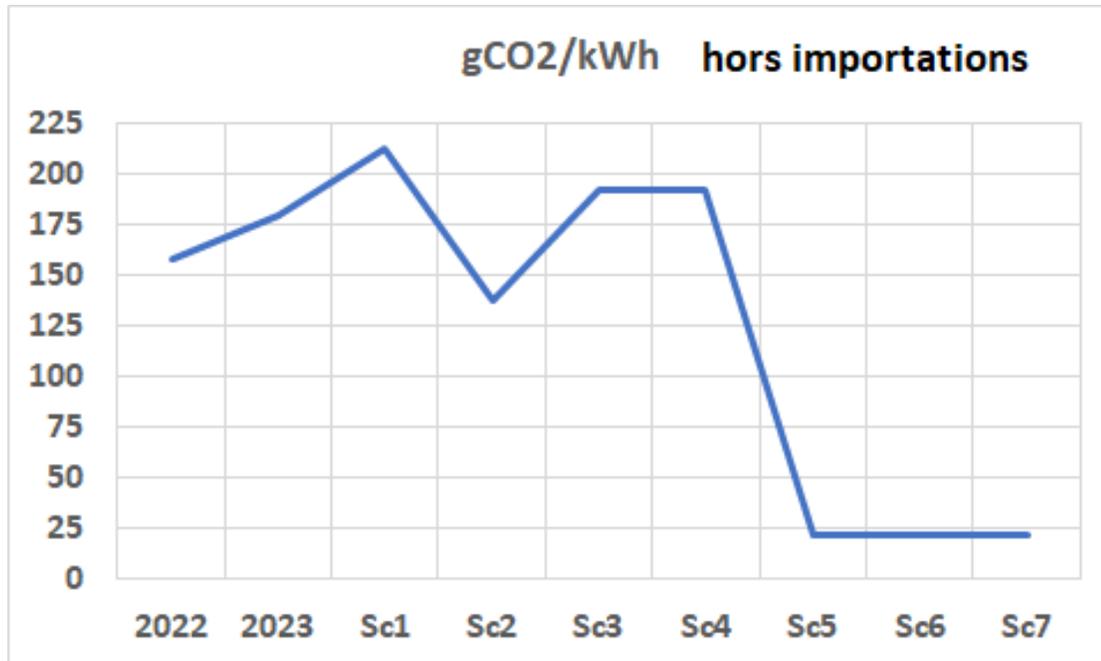
## VUE D'ENSEMBLE 2022/2023 7 scénarios

Consommation mix 40,1 TWh Janvier à Juin 2023

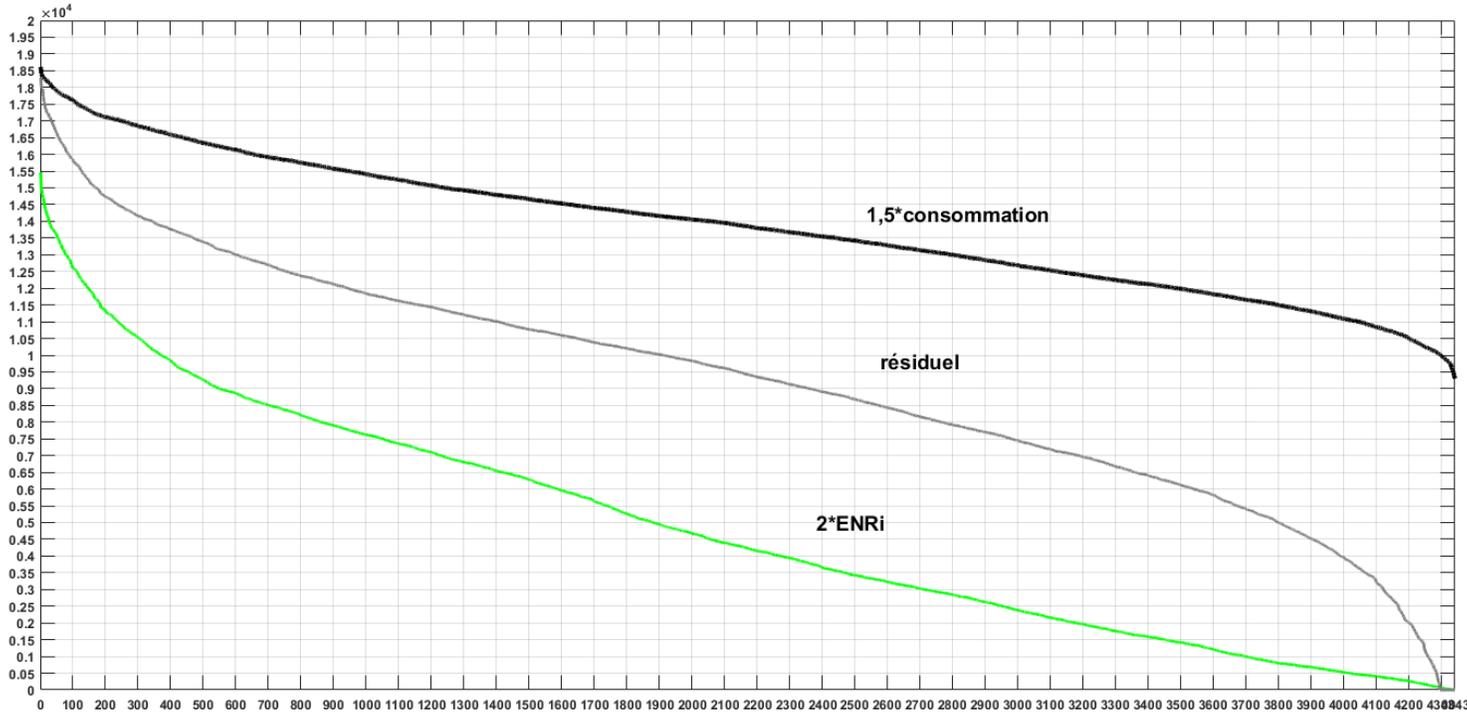


Production 100%=40,1 TWh en 2023





# Un exercice avec les courbes de charge



**4343 h données 2023**  
**consommation +50% ENRi +100%**  
**60 TWh/semestre**

**18 GW résiduel FC 50% 40 TWh**  
**25 GW ENRi FC 20% 20 TWh**

**18 GW pilotables pourraient produire 60 TWh avec un facteur de charge de 77%**

**LES ENRi ne servent à rien pour le réseau car on pourrait produire la même chose avec les seuls pilotables**

# Constatations finales

Pour s'en sortir avec moins de pilotables, ou plus du tout, on devra accepter la pénurie, même avec 2, 3 ou 4 fois plus de capacités photovoltaïques et éoliennes qu'en 2023 **(irréalisable en Belgique)**

Aucun réseau ne pourrait supporter ces surcapacités qui produiraient toujours moins d'électricité qu'en 2022 et dont une grande partie resterait inutilisable - même en supposant des capacités de stockage accrues **(irréalistes en Belgique)**

**Une électrification accrue serait impossible sans nouvelles capacités pilotables.** Si on refuse le nucléaire, on aurait nécessairement une croissance des émissions de CO2 avec le gaz naturel ou le charbon que l'on devra rajouter

QR ?