

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



www.cea.fr

**Caractériser le besoin en flexibilité/stockage
généralisé par l'intégration d'énergies
renouvelables intermittentes.**

Comment le stockage peut-il y répondre ?

Résultats de thèse d'Arthur Clerjon

Hydro 21, 07/12/2018
Fabien Perdu

1. BESOIN DE FLEXIBILITÉ

Analyse de profils de production et de consommation de 2012 à 2015

Le besoin de flexibilité est introduit par ce qu'on ne maîtrise pas :
Consommation - Production non pilotable

Données RTE renormalisées à un parc futur

0% intermittent

100% PV

100% éolien

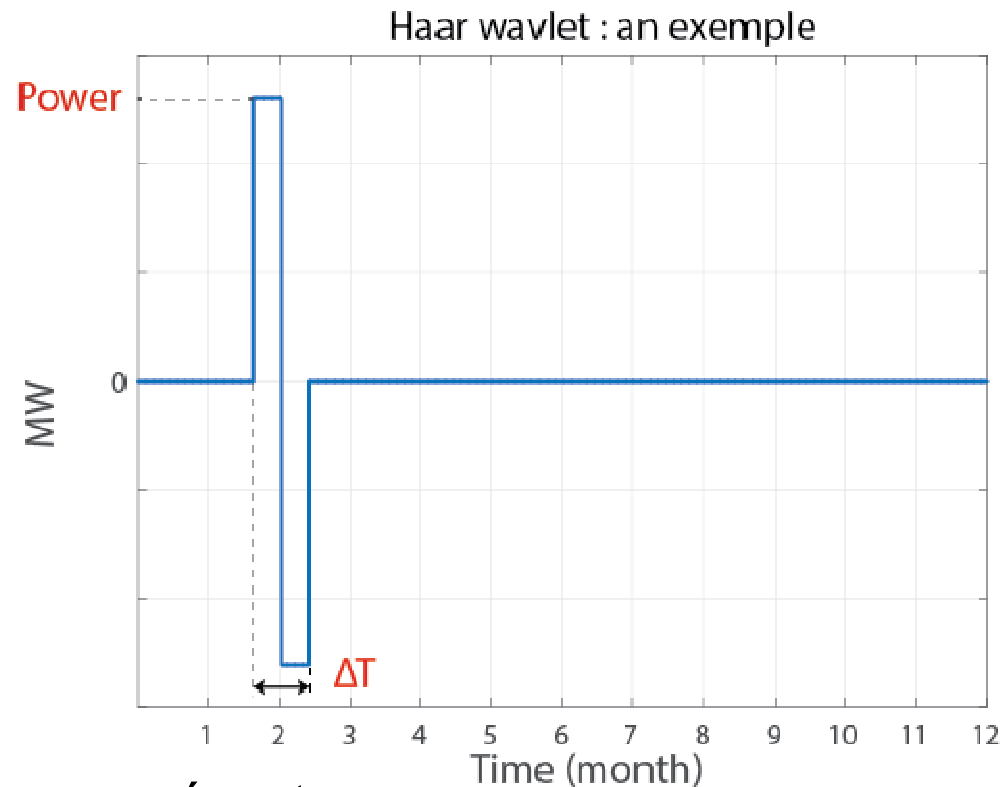
10% PV + 26% éolien (~scénario Volt)

Echelle :

France 'plaque de cuivre', pas d'import/export

Un point par 30 minutes

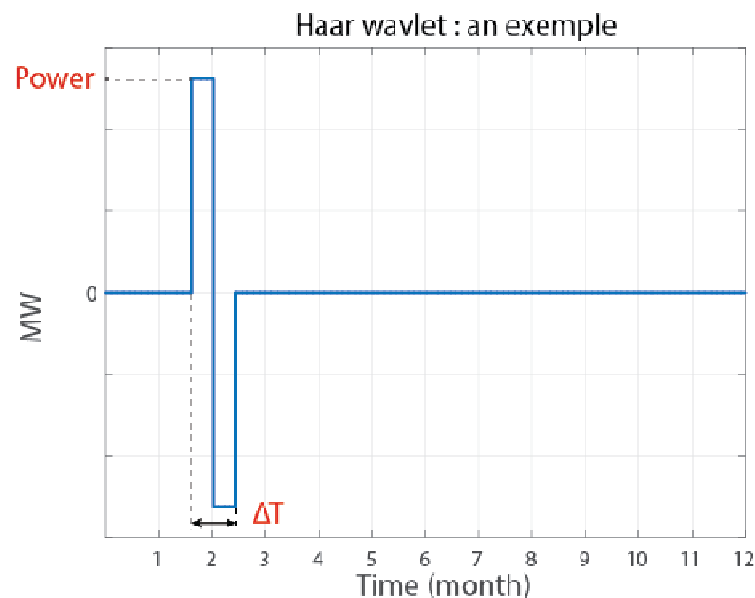
Le signal est décomposé sur des ondelettes de Haar :



Chacune représente
une certaine énergie
déplacée sur une certaine durée
à un certain moment

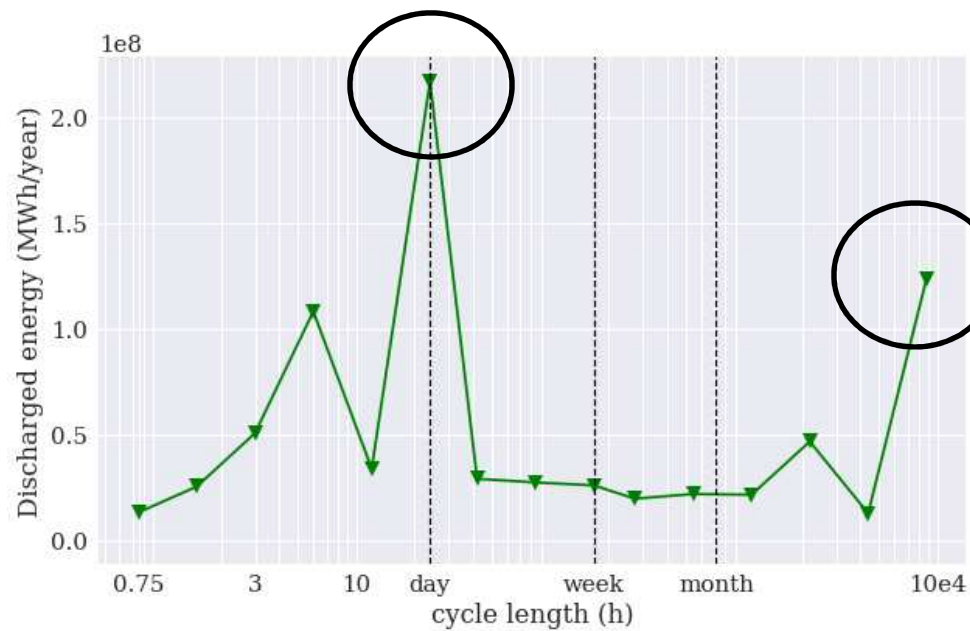
On en déduit pour chaque échelle de temps de 1/2h à 1 an

- L'énergie totale à déplacer pendant l'année
- La puissance nécessaire pour le faire
- Dans le cas d'un stockage, la taille du stock nécessaire

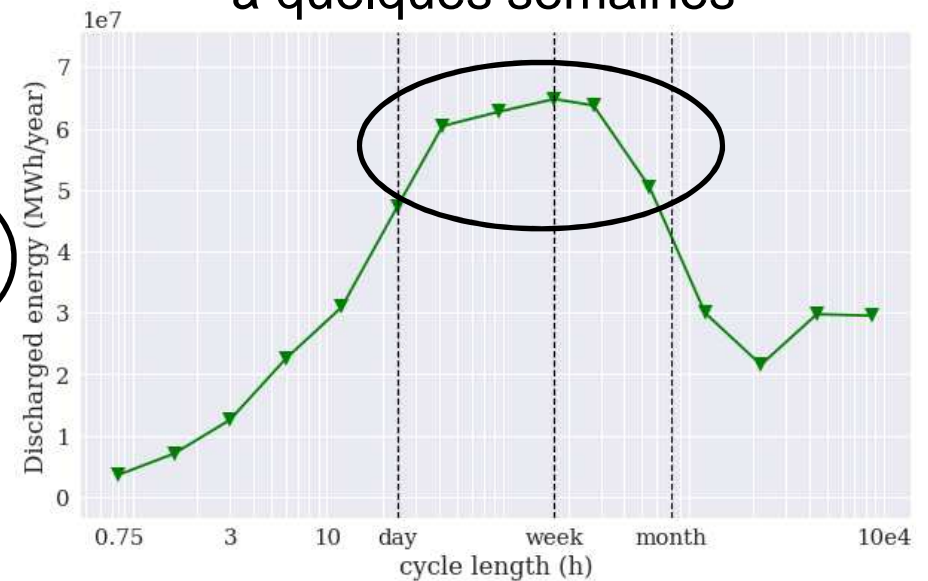


Energie totale à déplacer pendant l'année (=service rendu par la flexibilité)

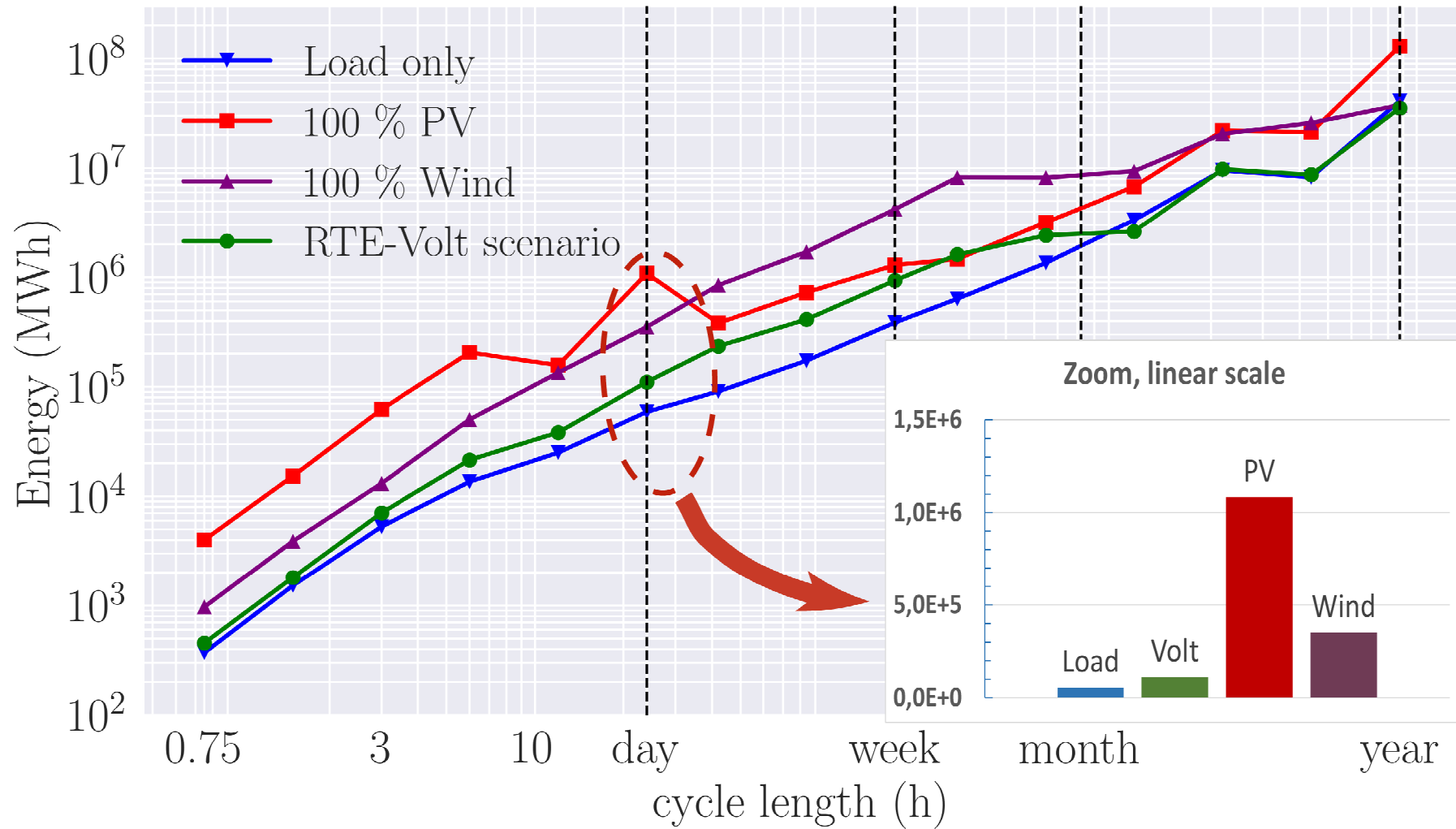
PV : concentré sur 1 jour et un an

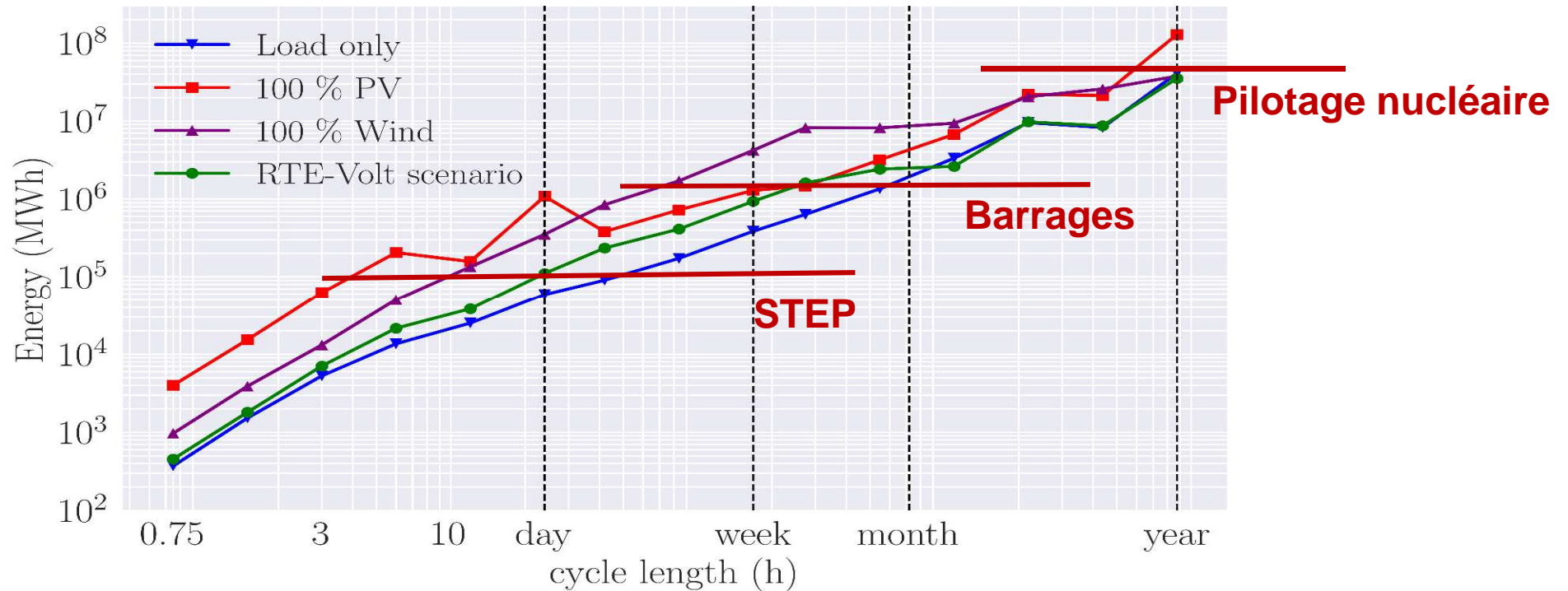


Eolien : de quelques jours à quelques semaines



Taille du stock (attention échelle log!)





Tout l'effacement en 2017	66 GWh/an
Stock des STEP	100 GWh
Stock des barrages	2 TWh
Arrêt du nucléaire 10% du temps	55 TWh/an

Sources : http://clients.rte-france.com/lang/fr/visiteurs/vie/prod/stock_hydraulique.jsp
<http://bilan-electrique-2017.rte-france.com/flexibilite/53-effacements/#>
 Cactéristiques générales des STEPS EDF en France, X. URSAT et al, 2011

2. POTENTIEL DES STOCKAGES

Principe : comparer (ramené à une année)

- le service rendu : énergie déplacée par le stockage
- à un coût : énergie grise nécessaire à fabriquer le dispositif

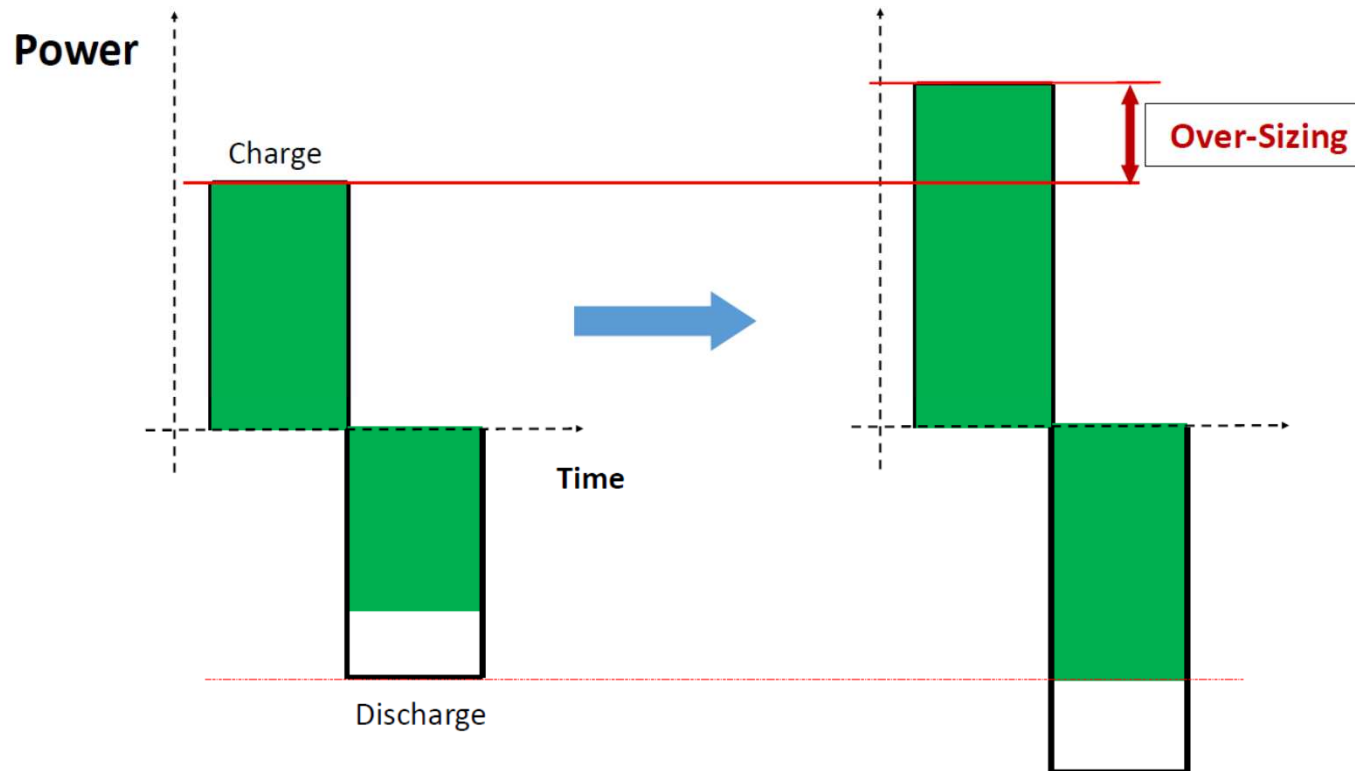
Difficulté :

Les énergies grises (cradle to gate) sont difficiles à trouver
=> considérer les résultats en ordre de grandeur...

Cet indicateur peut être un bon indice pour les coûts, les émissions de CO₂,..
Mais il ne rend pas compte des limites géologiques ou en matériaux critiques

POTENTIEL DES STOCKAGES

- Problème : le rendement d'un stockage n'est jamais 100%
- ⇒ Il faut surdimensionner le parc de production
 - ⇒ Cela induit une énergie grise supplémentaire



Energie à déplacer sur l'année

ESOI =



+



Energie grise pour
surdimensionnement du parc
de production

Energie grise pour
stockage

Solutions considérées

- Batteries Li-ion
- Hydraulique (STEP)
- Air comprimé (CAES)
- Power to H₂ to power
avec ou sans bouteilles H₂
- Curtailment (pas de stockage, que du surdimensionnement)

Cas 100% éolien

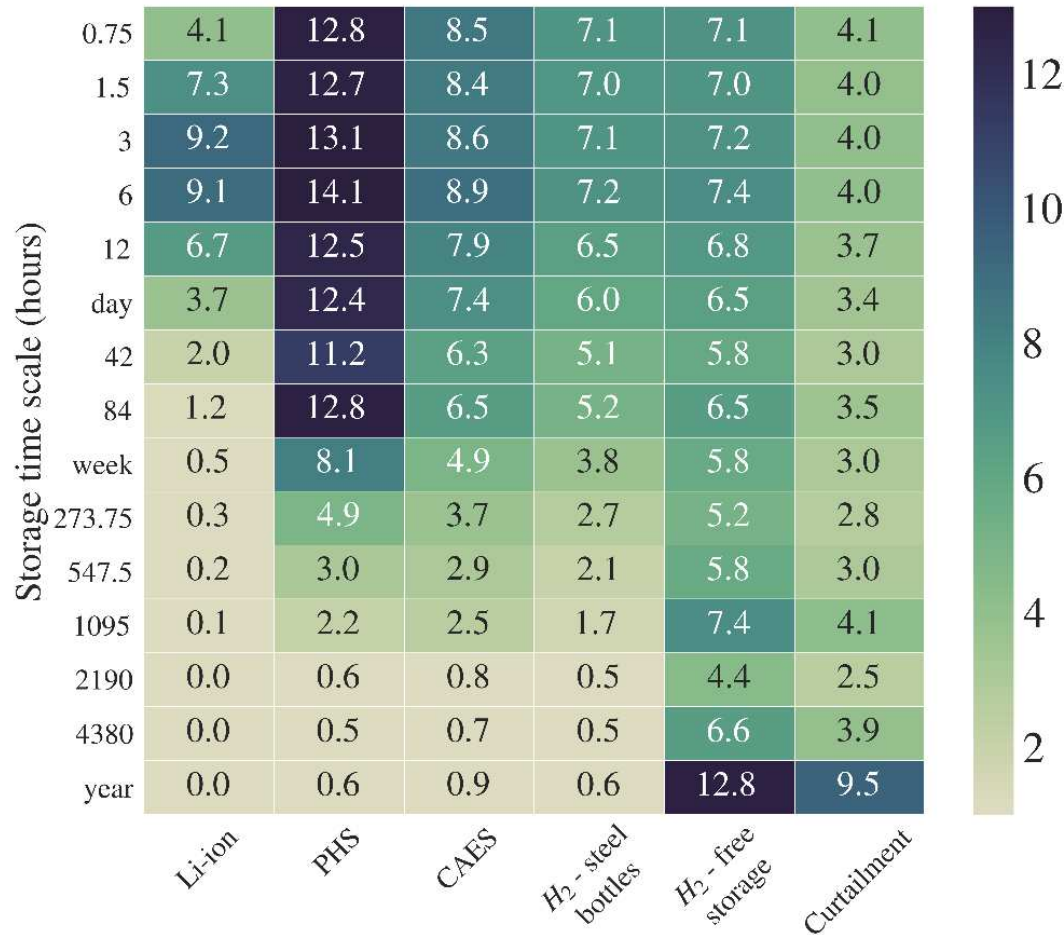
Batteries OK jusque un jour
Mutualisables avec la **mobilité (V2G)**

Hydraulique OK jusque un mois

Storage time scale (hours)	Li-ion	PHS	CAES	H ₂ - steel bottles	H ₂ - free storage	Curtailment
0.75	4.0	9.9	5.5	4.7	4.7	2.6
1.5	6.7	9.2	4.9	4.2	4.3	2.3
3	8.1	9.3	4.9	4.1	4.2	2.1
6	7.9	8.7	4.3	3.6	3.7	1.7
12	5.2	9.0	4.2	3.5	3.6	1.5
day	3.3	10.1	4.3	3.5	3.7	1.4
42	1.8	8.9	3.2	2.5	2.7	0.6
84	1.0	9.8	3.5	2.7	3.3	0.9
week	0.5	7.1	2.9	2.2	3.1	0.8
273.75	0.3	4.3	2.1	1.5	2.6	0.8
547.5	0.1	2.7	1.9	1.3	3.1	1.1
1095	0.1	1.6	1.6	1.1	3.8	1.7
2190	0.1	1.1	1.2	0.8	4.7	2.0
4380	0.0	0.4	0.5	0.3	3.9	1.9
year	0.0	0.3	0.5	0.3	6.0	3.1

Systemes à faible rendement moins rentables

Scénario Volt (10%PV 26%éolien)

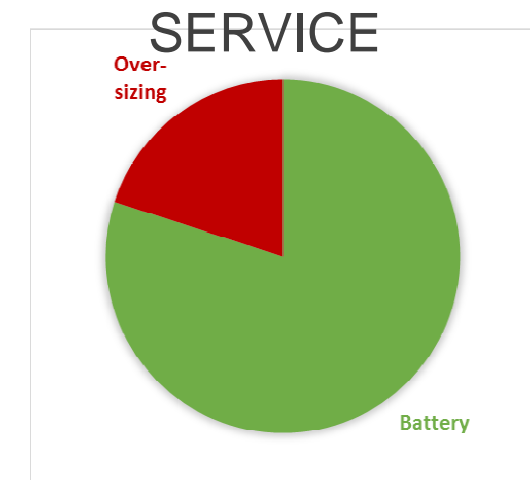
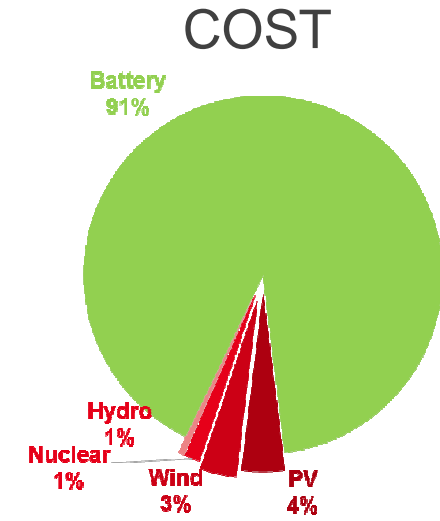
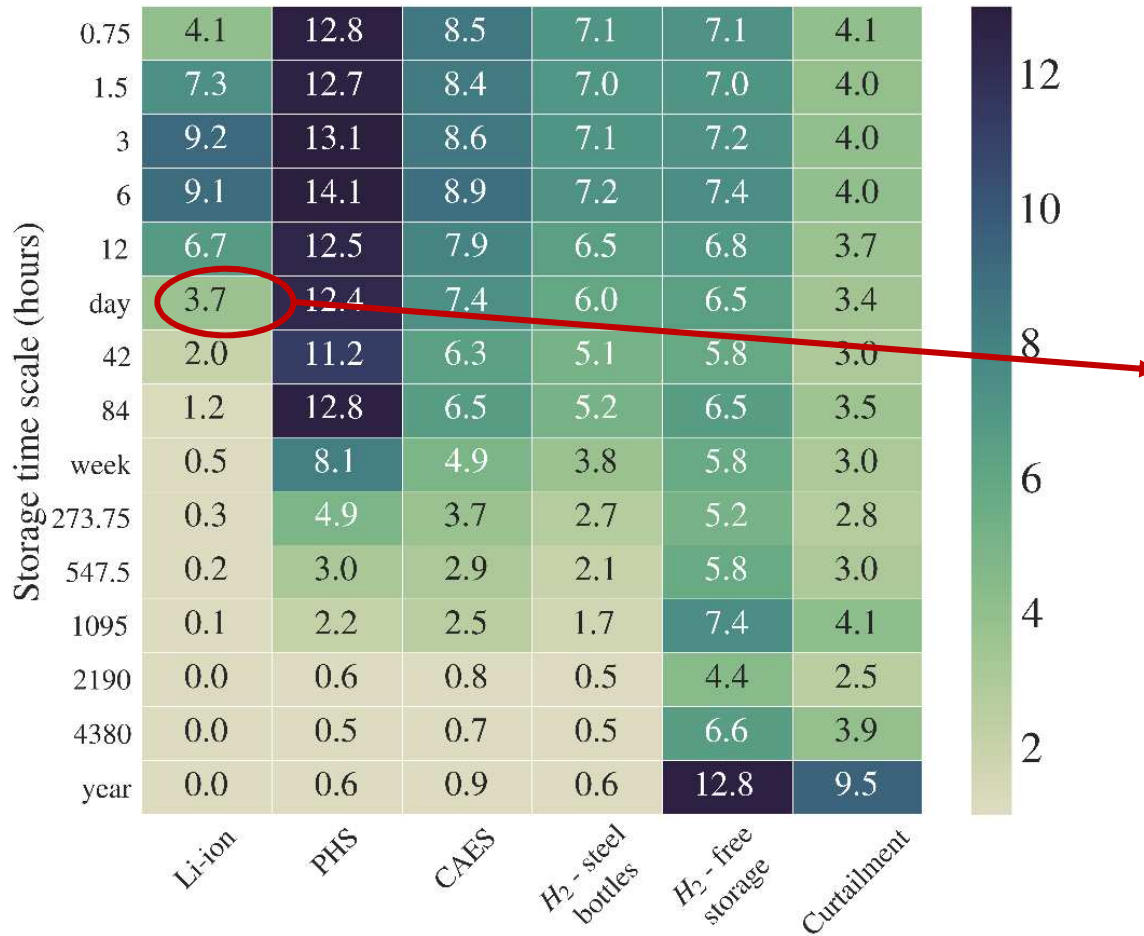


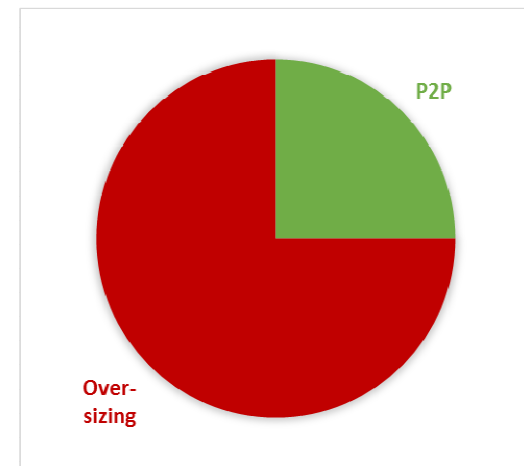
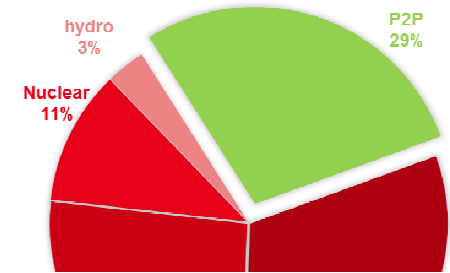
Moins d'intermittence
⇒ Systèmes à faible rendement
peuvent devenir rentables.

Pourquoi ?

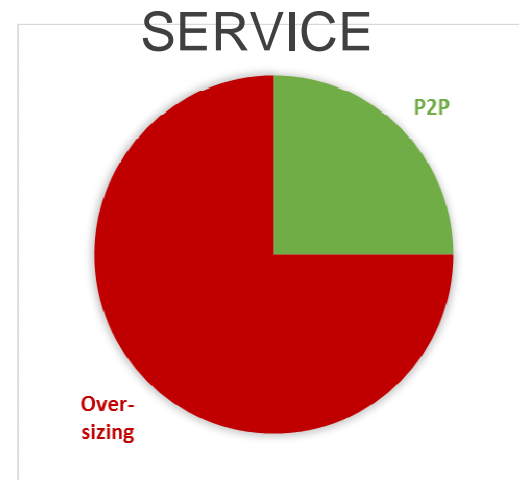
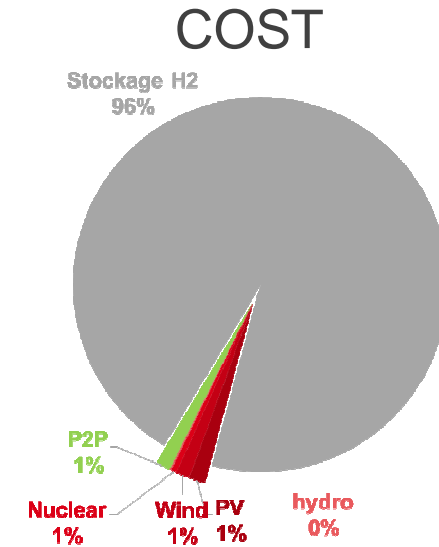
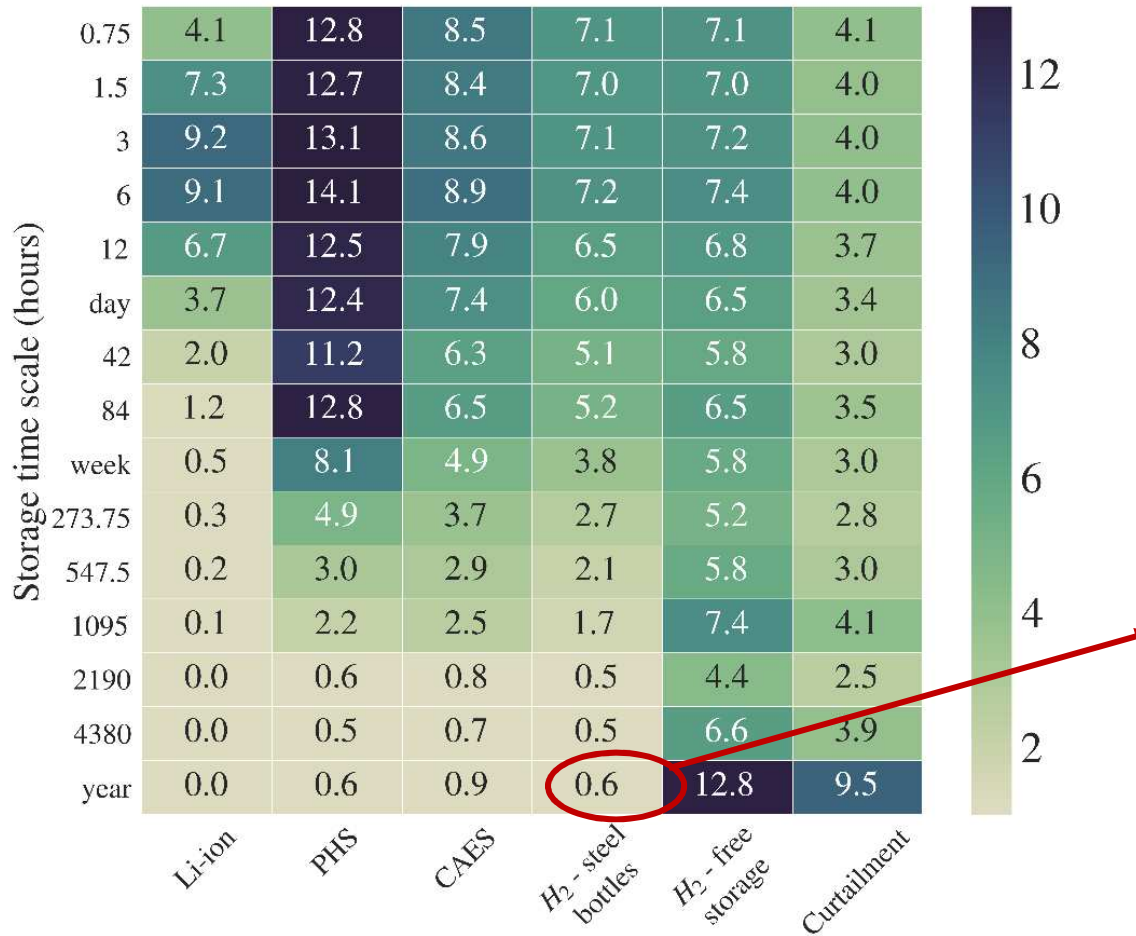
POTENTIEL DES STOCKAGES

Scénario Volt (10%PV 26%éolien)





Scénario Volt (10%PV 26%éolien)



- **Aux temps courts, les batteries et les STEPs sont pertinentes**
(journalier pour les batteries, jusqu'au mois pour les STEP)
- **Difficultés particulières aux temps longs (> 1 mois)**
 - Solution actuelle = production pilotable (surtout nucléaire)
C'est la plus efficace
 - Pas de solution satisfaisante en stockage électrique
sauf H₂ si cavités géologiques disponibles et ~gratuites.
 - Curtailment possible (surdimensionner le parc plutôt que d'investir dans un stockage) tant que la proportion d'ENR intermittentes est limitée
- **Un taux de pénétration élevé d'EnR intermittentes diminue fortement le retour sur investissement énergétique des systèmes de stockage**
 - Plus particulièrement ceux dont le rendement est faible (H₂, CAES)

- **Pistes à explorer : approches multivecteurs**

Consommations pilotables d'électricité,
permettant de plus de décarboner un secteur aujourd'hui très émetteur

- Electrification des transports :
Pilotable à la journée au bon ordre de grandeur
Consommation **125 TWh_{elec}**, **125 Mt_{CO2}** économisables (-1000 g_{CO2}/kWh)
- Production de chaleur par pompes à chaleur :
l'intermittence saisonnière est d'origine thermique,
et la chaleur se stocke bien à long terme => pilotable jusqu'à l'année
Consommation **100 TWh_{elec}**, **90 Mt_{CO2}** économisables (-900 g_{CO2}/kWh)
- Consommation pilotable pour production d'H₂ industriel :
Pilotable à l'année si stockage H₂ géologique
Consommation **50 TWh_{elec}**, **13 Mt_{CO2}** économisables (-250 g_{CO2}/kWh)
- Pour comparaison, la production électrique française
représente **480 TWh_{elec}**, **30 Mt CO₂** (60 g_{CO2}/kWh)

MERCI DE VOTRE ATTENTION



PARAMÈTRES UTILISÉS

Table 1 Parameters of storage devices except power-to-gas-to-power.

Component	Symbol	Quantity	Value	Unit
Li-ion batteries	ζ_P	Energy intensity in power	$2 \cdot 10^6$	$MJ_{prim}(MW_{el,in})^{-1}$
	ζ_E	Energy intensity in energy	$2 \cdot 10^6$	$MJ_{prim}(MWh_{el,in})^{-1}$
	η	Efficiency	80	%
	$T_{life,cal}$	Calendar life time	15	years
	N_{max}	Max number of cycles	5000	
.....
CAES	ζ_E	Energy intensity in energy	$2,6 \cdot 10^5$	$MJ_{prim}(MWh_{el,in})^{-1}$
	η	Efficiency	38	%
	$T_{life,cal}$	Calendar life time	40	years
.....
PHS	ζ_P	Energy intensity in power	$20 \cdot 10^6$	$MJ_{prim}(MW_{el,in})^{-1}$
	ζ_E	Energy intensity in energy	$3,7 \cdot 10^5$	$MJ_{prim}(MWh_{el,in})^{-1}$
	η	Efficiency	78	%
	$T_{life,cal}$	Calendar life time	60	years

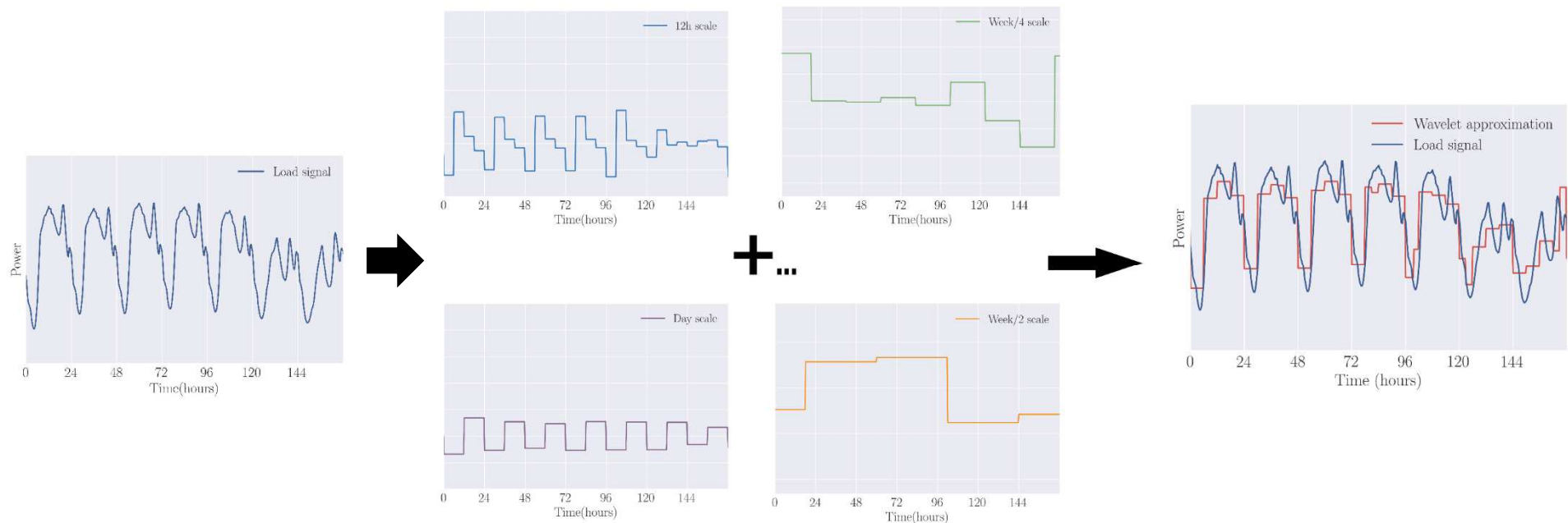
Component	Symbol	Quantity	Value	Unit
Alkaline Electrolyzer	$\zeta_{P,AEC}$	Energy intensity	$2,4 \cdot 10^6$	$MJ_{prim}(MW_{el,in})^{-1}$
	$T_{life,use,AEC}$	life-time in continuous use	10^5	hours
	η_{AEC}	Efficiency ($LHV_{H_2}/Electricity_{in}$)	65	%
.....				
Compressor	$\zeta_{P,comp}$	Energy intensity	$2,3 \cdot 10^5$	$MJ_{prim}(MW_{el,in})$
	η_{comp,H_2}	H_2 compressing efficiency	90,5	%
	$T_{life,use,comp}$	life-time in continuous use	10	years
.....				
PEM Fuel Cell	$\zeta_{P,FC}$	Energy intensity	$1,14 \cdot 10^6$	$MJ_{prim}(MW_{el,out})^{-1}$
	$T_{life,use,PEMFC}$	life-time in continuous use	10^4	hours
	η_{PEMFC}	Efficiency ($Electricity_{out}/LHV_{H_2}$)	48	%
H_2 storage	$\zeta_{steel\ storage,H_2}$	Energy intensity of steel bottles for H_2 storage	27	$MJ_{prim}(MJ_{LHV,H_2})^{-1}$
	$\zeta_{H_2\ storage,geol}$	Energy intensity of geological cavities	0	$MJ_{prim}(MJ_{LHV,H_2})^{-1}$
	$T_{life,cal,stor}$	Calendar life-time	20	years

Facility	ζ_P $MJ_{prim} (MW_{elec})^{-1}$	$T_{life,cal}$ year	Capacity Factor %
Wind power	$10 \cdot 10^6$	20	25 %
Photovoltaic	$25 \cdot 10^6$	30	13 %
Nuclear Power	$20 \cdot 10^6$	60	80 %
Hydro-electricity	$15 \cdot 10^6$	60	28 %

LIMITES DU MODELE

- **On ne peut pas conclure sur un parc de stockage optimal (même à l'intérieur d'une échelle de temps)**
- **On ne peut pas voir l'interaction entre plusieurs échelles de temps ni entre le stockage et le pilotable**
- **Incertitudes sur les données d'entrées mais les ordres de grandeur sont assez robustes**

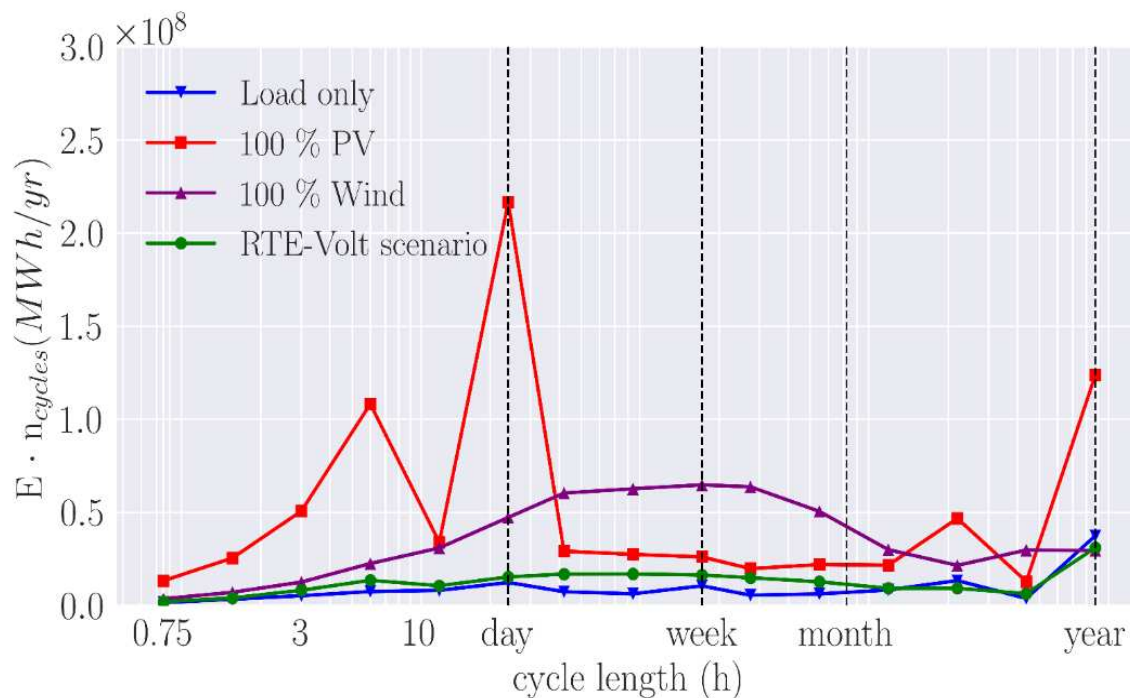
BESOIN DE FLEXIBILITÉ



Avec toutes les échelles de temps, la reconstruction est très fidèle (courbes rouges et bleues superposées)

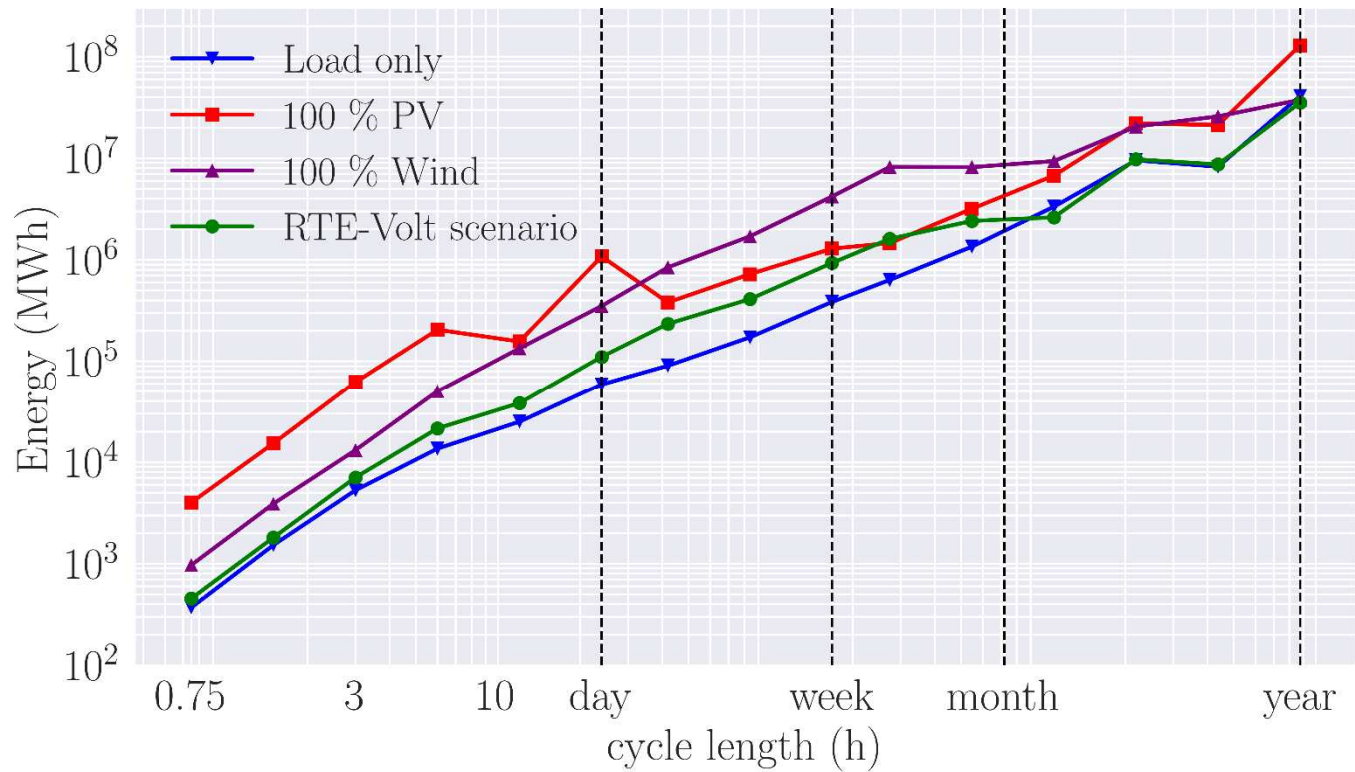
Energie totale à déplacer pendant l'année (=service rendu par la flexibilité)

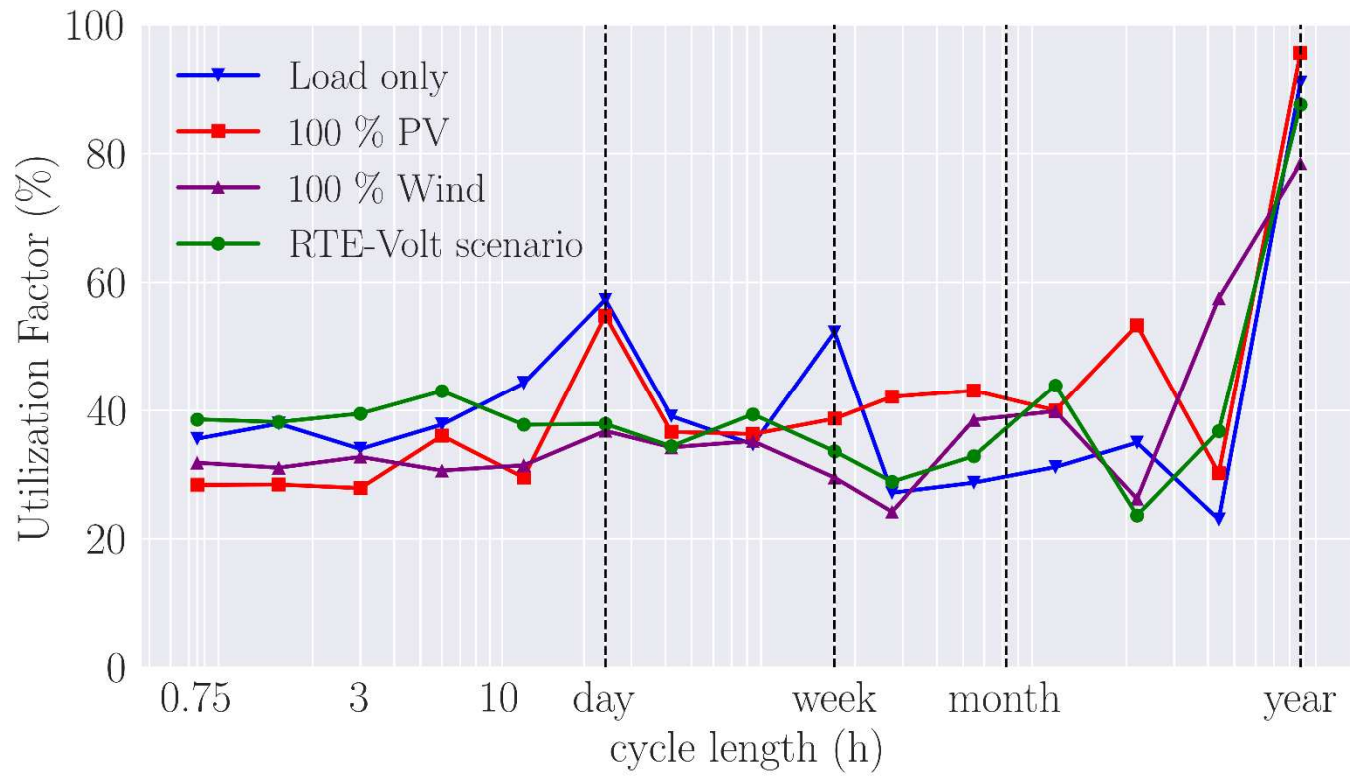
Scénario Volt

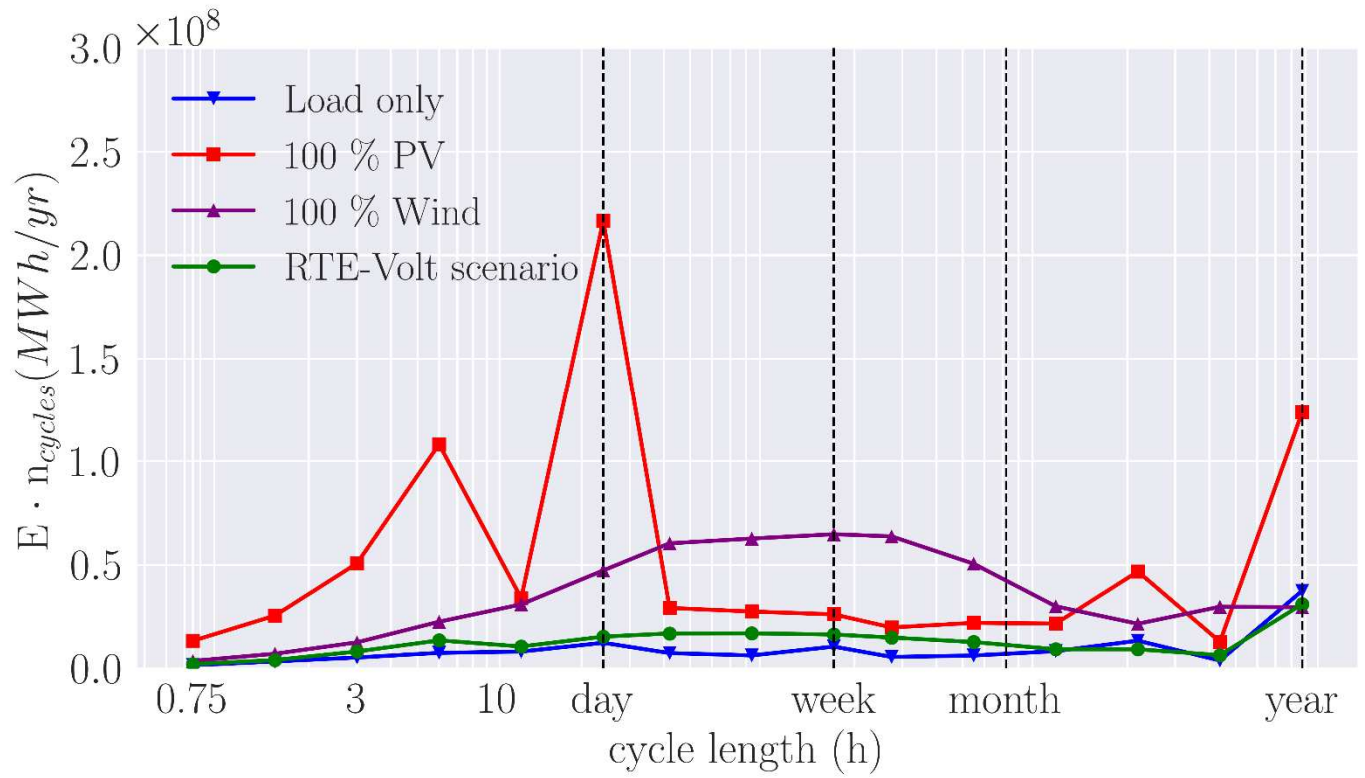


Une intégration modérée d'EnRi (36%) génère un besoin en flexibilité inférieur à la somme des composantes.

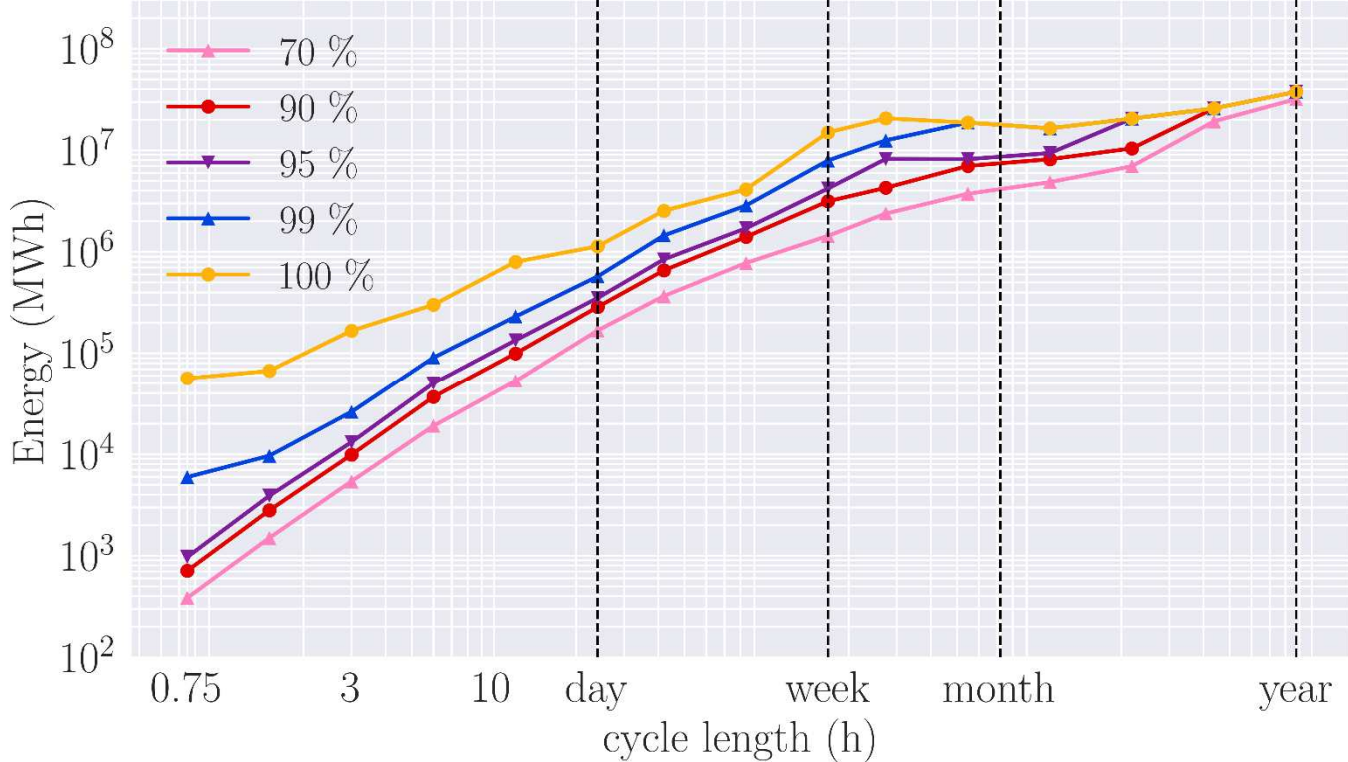
A l'année par exemple : l'éolien produit plus en hiver



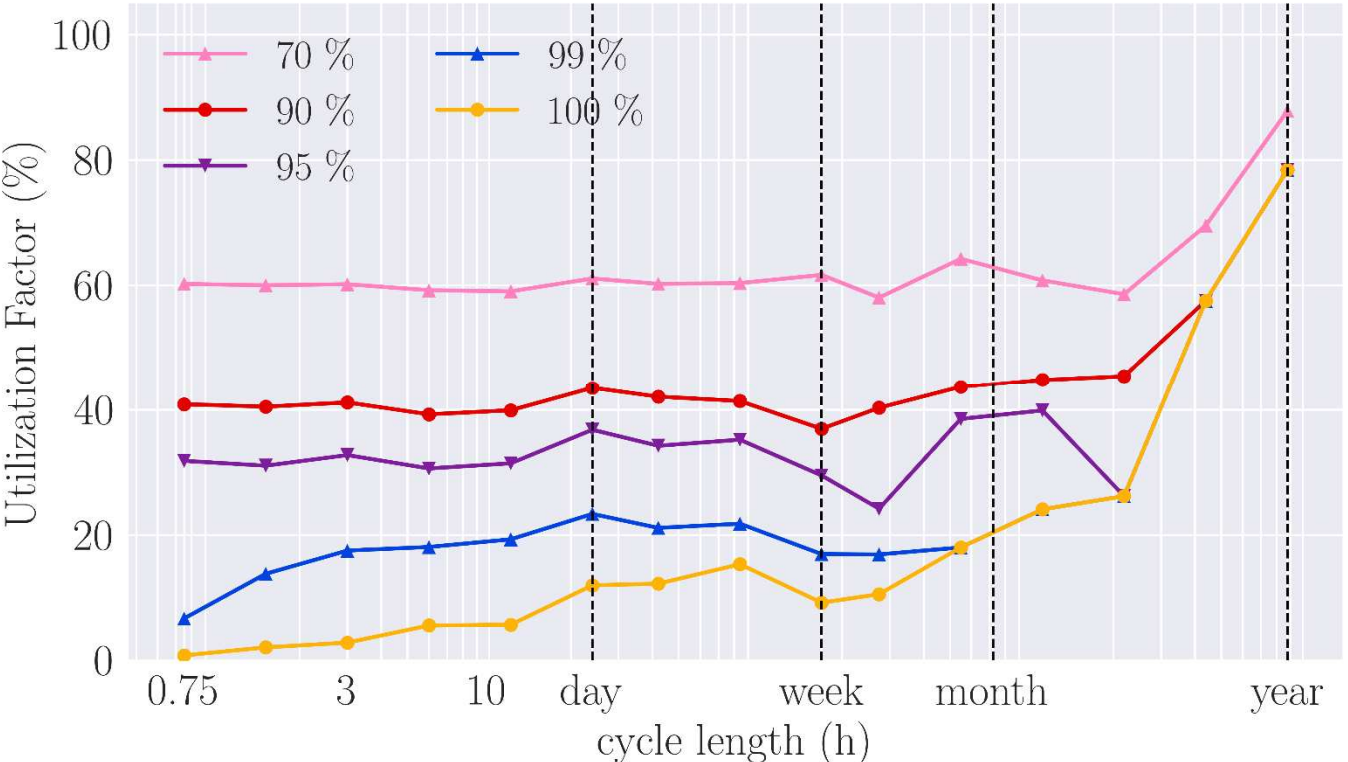




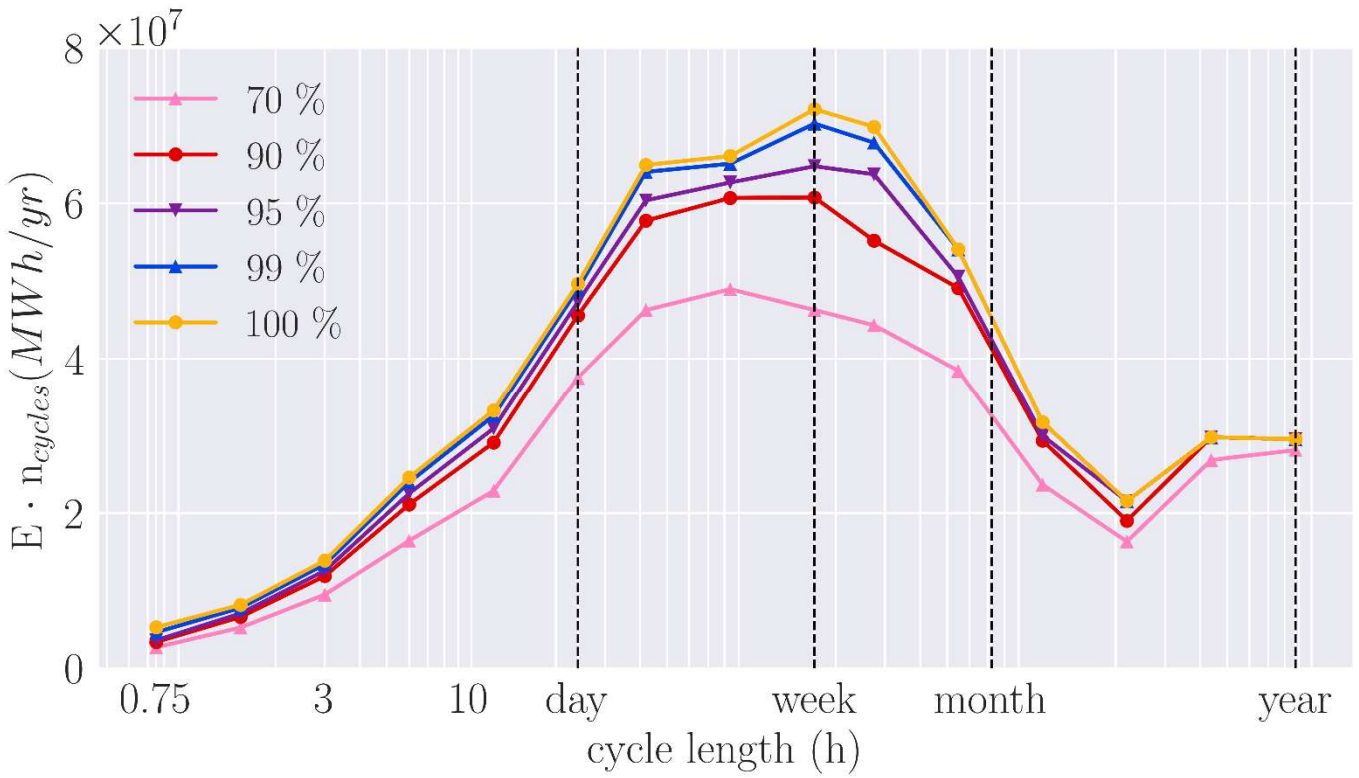
DEMANDE RÉSIDUELLE EOLIENNE



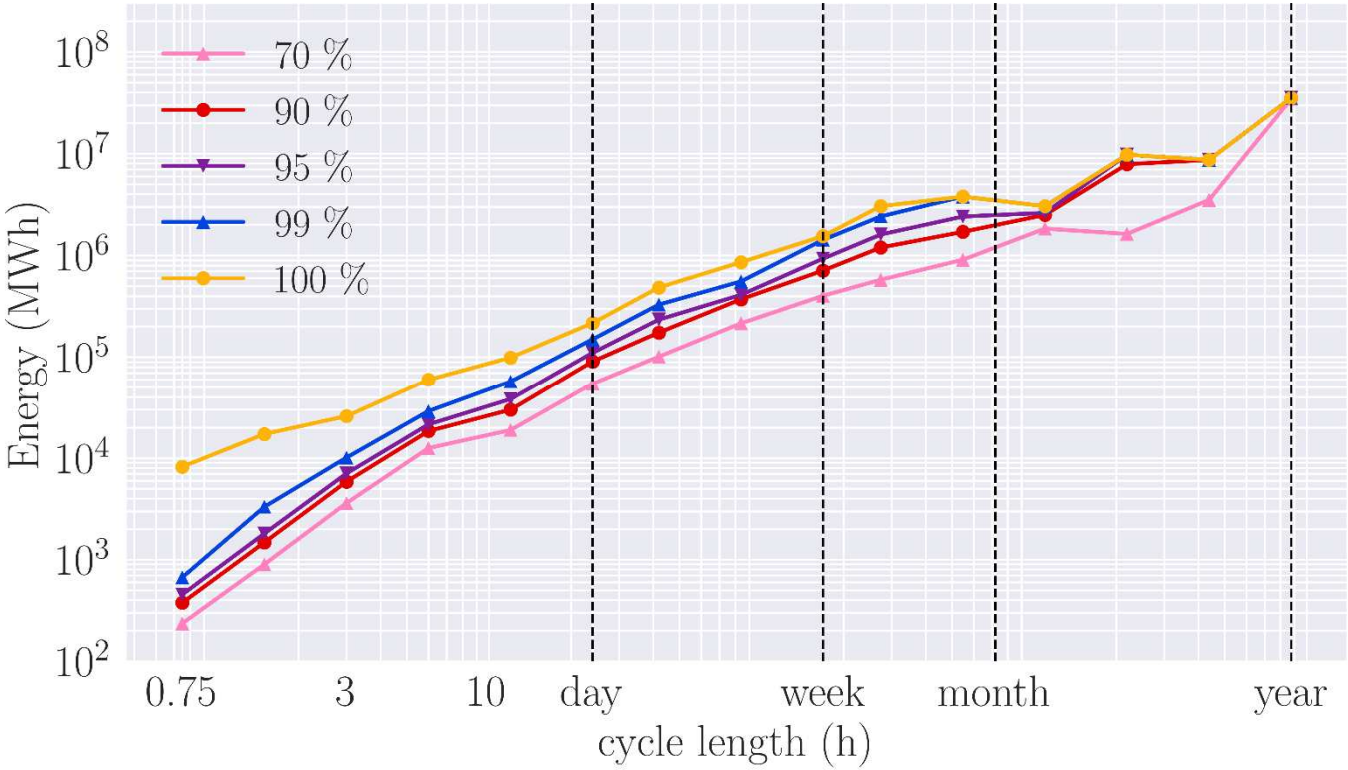
DEMANDE RÉSIDUELLE EOLIENNE



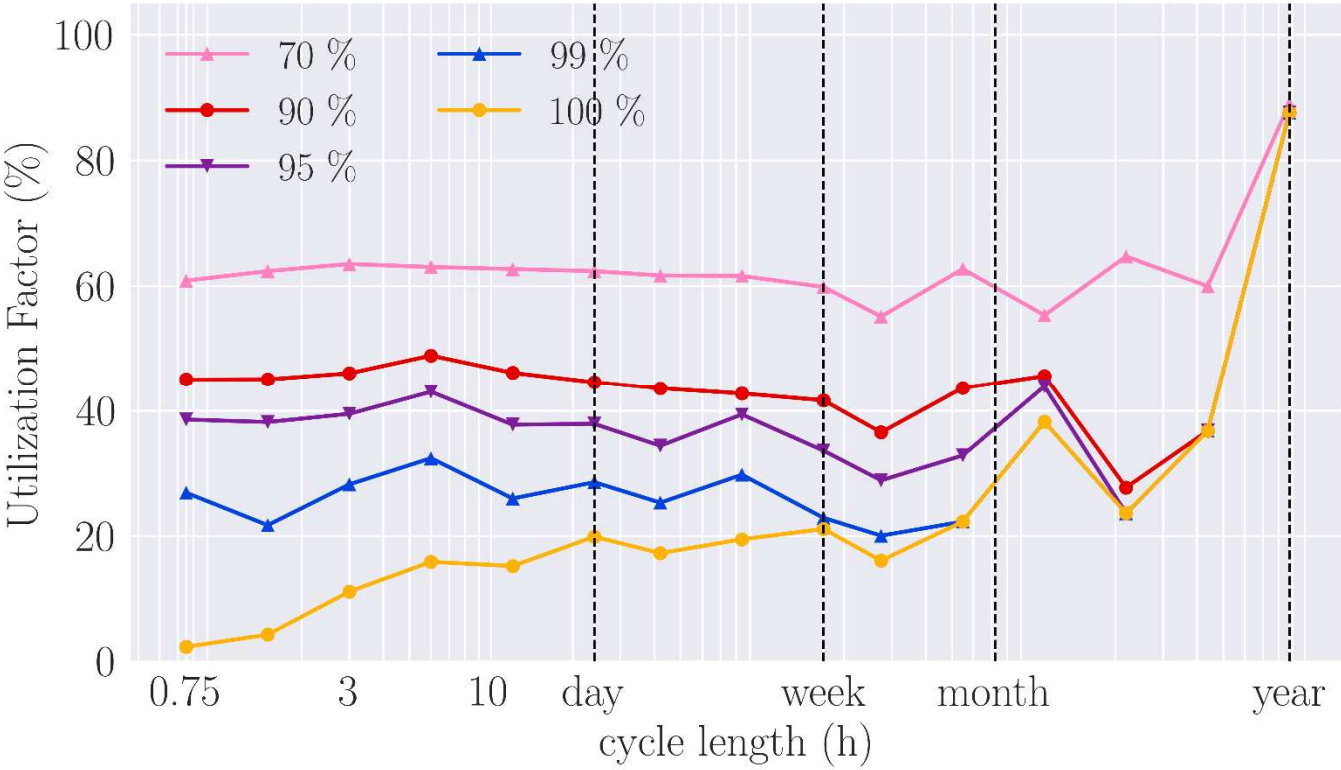
DEMANDE RÉSIDUELLE EOLIENNE



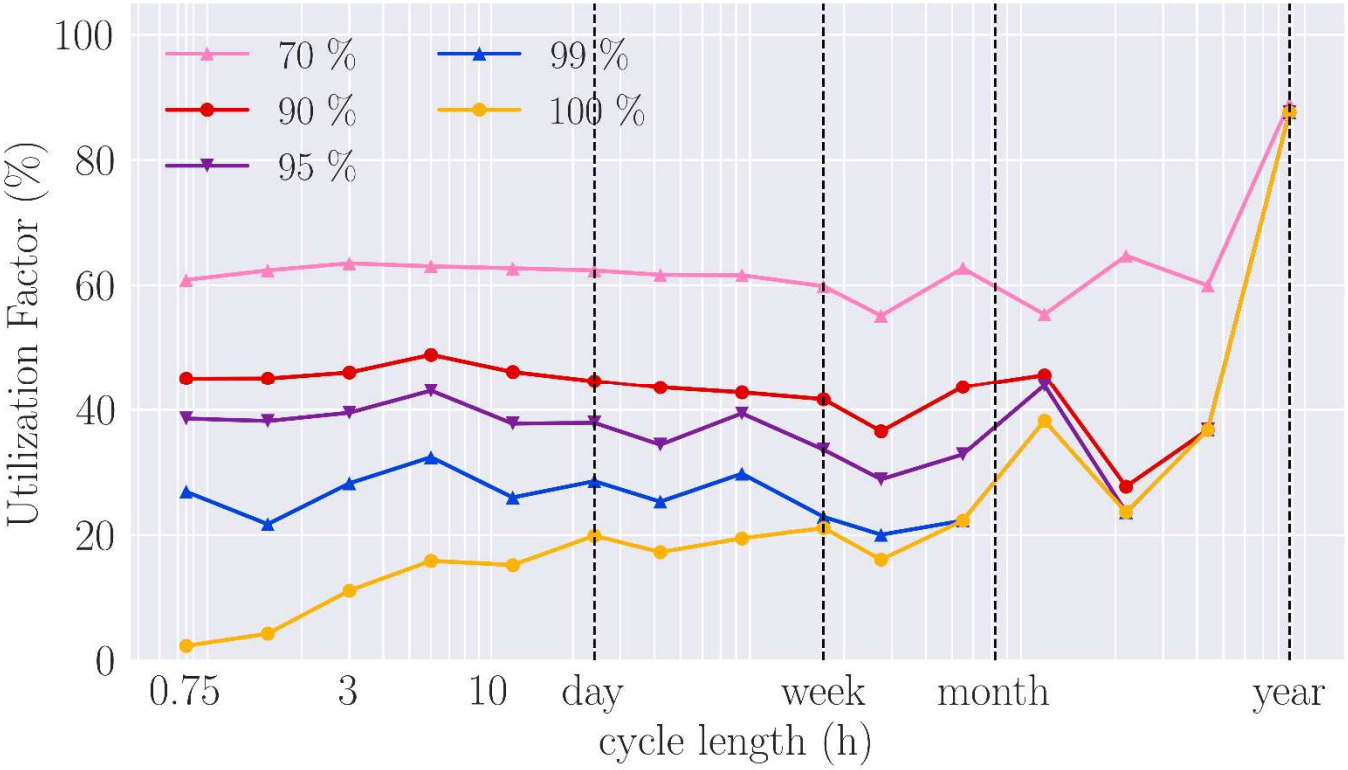
DEMANDE RÉSIDUELLE VOLT



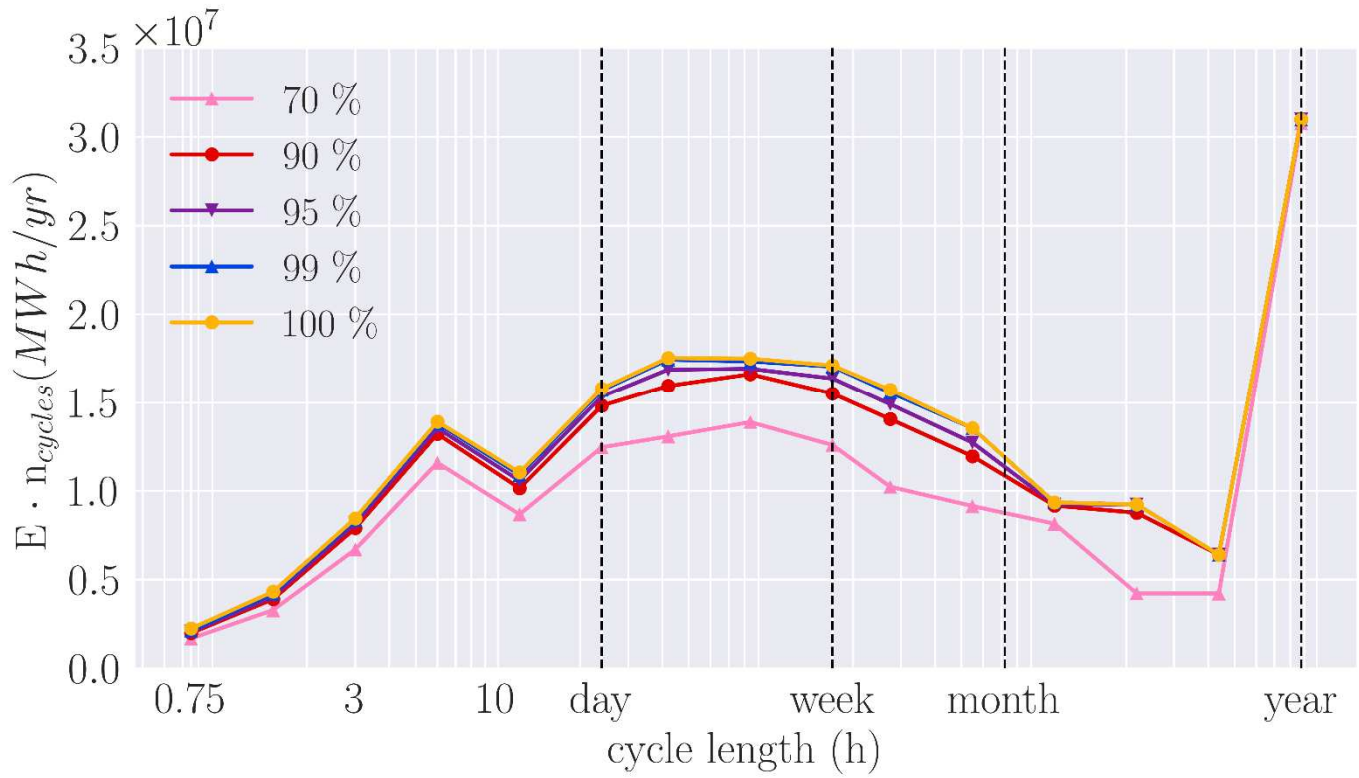
DEMANDE RÉSIDUELLE VOLT



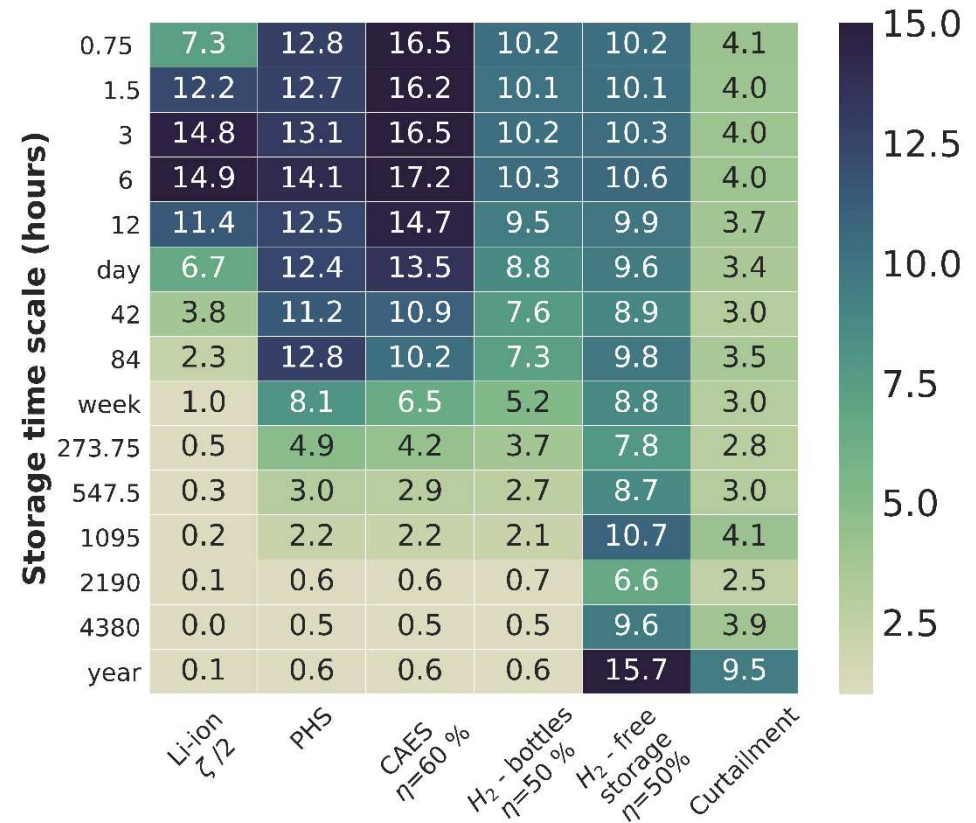
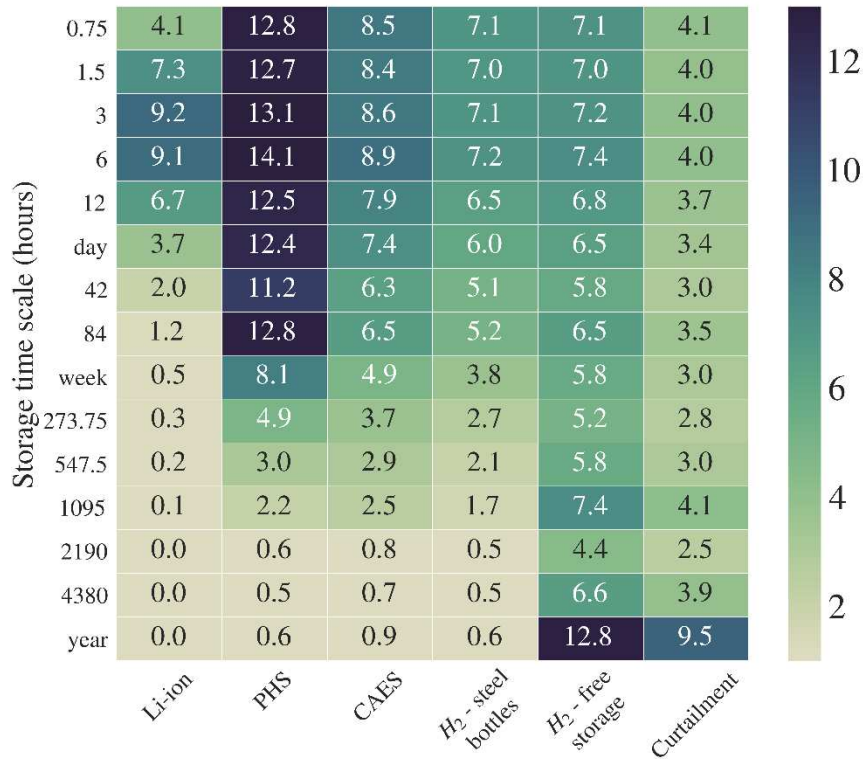
DEMANDE RÉSIDUELLE VOLT



DEMANDE RÉSIDUELLE VOLT



TEST DE SENSIBILITÉ SCÉNARIO VOLT



- L'énergie grise des batteries Li-ion est divisée par 2
- Les STEPS sont inchangés
- Le CAES voit son rendement round trip passer de 38% à 60%
- Le rendement round-trip du power-to-gas passe de 30% à 50%