



LE STOCKAGE THERMIQUE À L'ÉCHELLE INDUSTRIELLE: UN SUJET « CHAUD »

Par Nicholas Annejohn
Ecosystem

20 septembre 2023



Le stockage thermique à l'échelle industrielle : un sujet « chaud » !



Nicholas Annejohn

Concepteur Senior chez *Ecosystem*

Candidat à la maîtrise à l'université McGill

AGENDA

Décarbonation du chauffage
industriel

Technologies de stockage
thermique

Applications du stockage
thermique *power-to-heat*

Applications et limitations sur le
marché québécois

Étude de cas

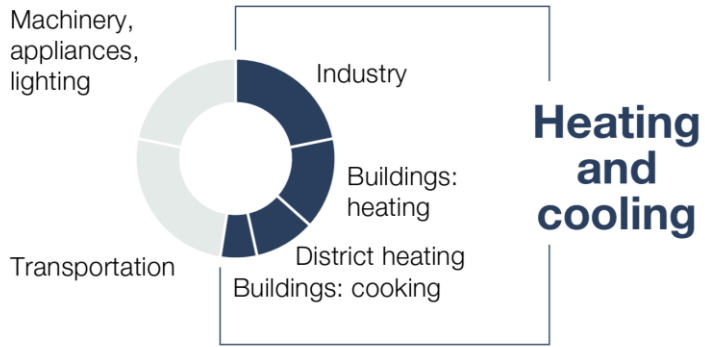
Conclusion et questions

A black and white photograph of an industrial facility. The scene is filled with large, complex machinery, including pipes, valves, and structural beams. A prominent feature is a large, vertical cylindrical component on the left side, which appears to be part of a boiler or heat exchanger. In the lower center, a circular pressure gauge is visible, with a scale ranging from 0 to 1000. The overall atmosphere is one of a busy, industrial environment. The text is overlaid on a semi-transparent dark band across the middle of the image.

Décarbonation du chauffage
industriel : de défi à levier pour la
transition énergétique

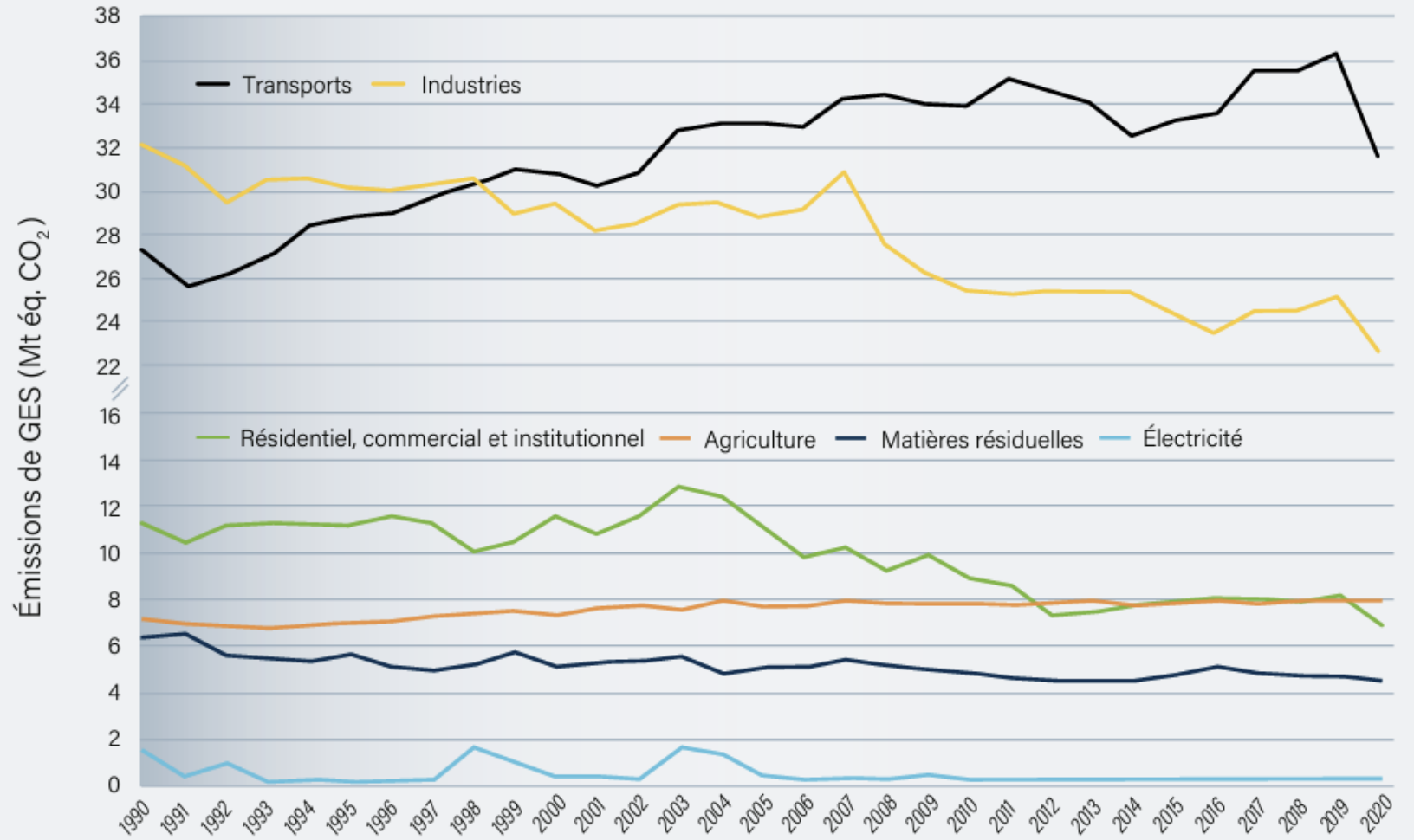
Décarbonation du chauffage industriel

Global final energy consumption by sector



Long Duration Energy Storage Council

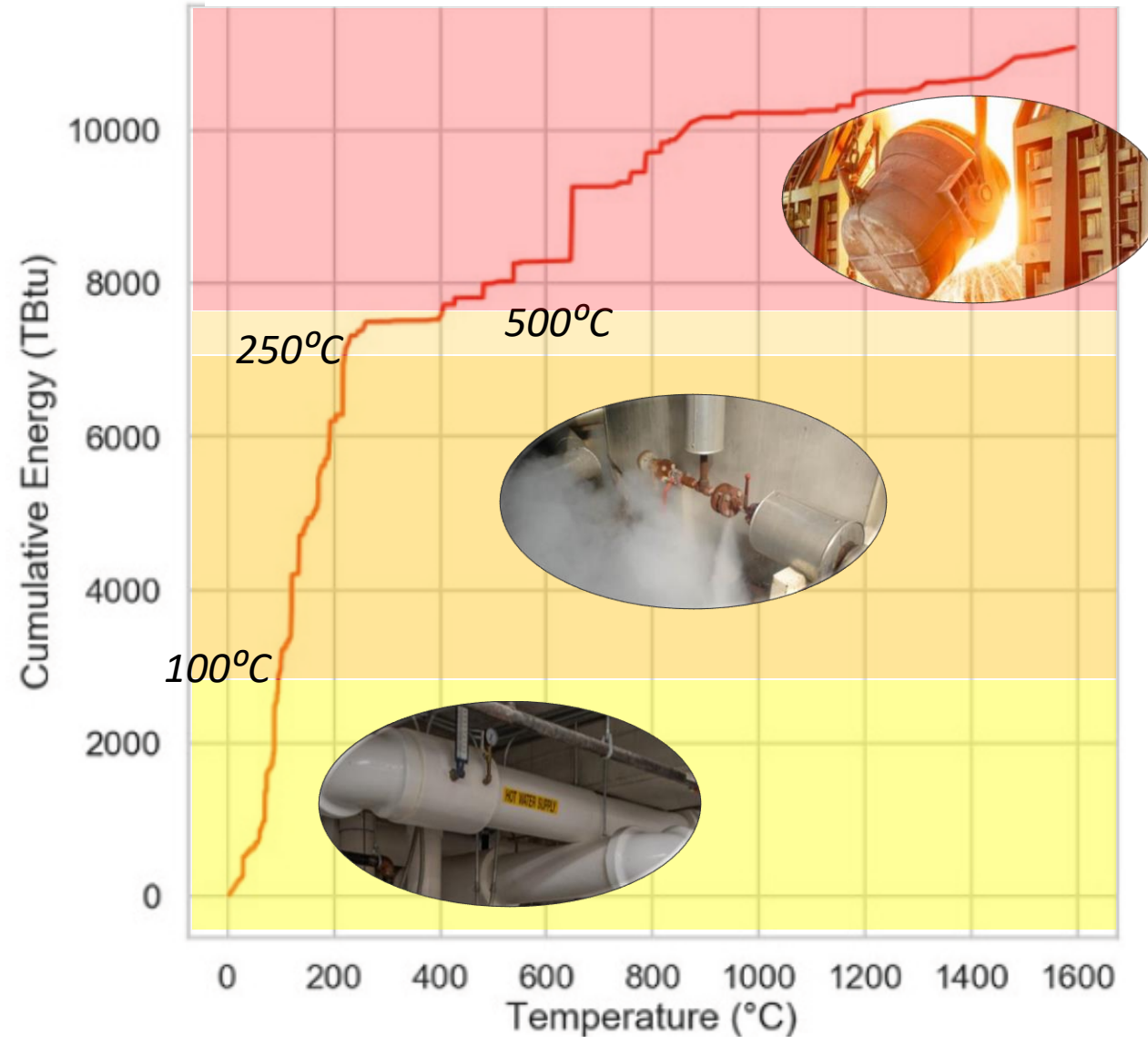
Émissions de GES au Québec par secteur d'activité entre 1990 et 2020



Décarbonation du chauffage industriel

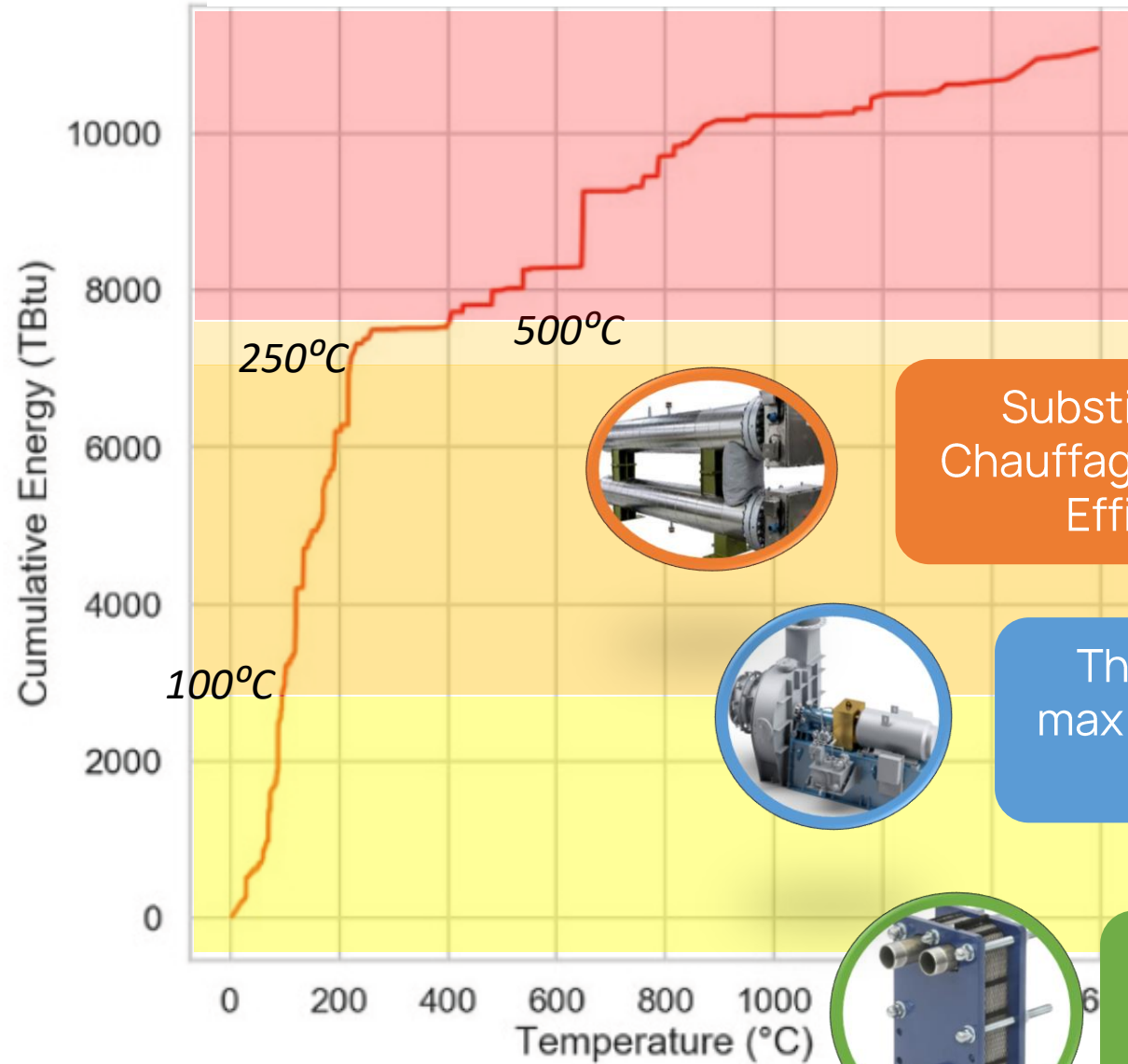
- Consommation répartie entre différents grades de température

Répartition de la consommation de la chaleur industrielle aux É-U



Décarbonation du chauffage industriel

Répartition de la consommation de la
chaleur industrielle aux É-U



Substitution d'énergie:
Chauffage électrique directe
Efficacité ~100%

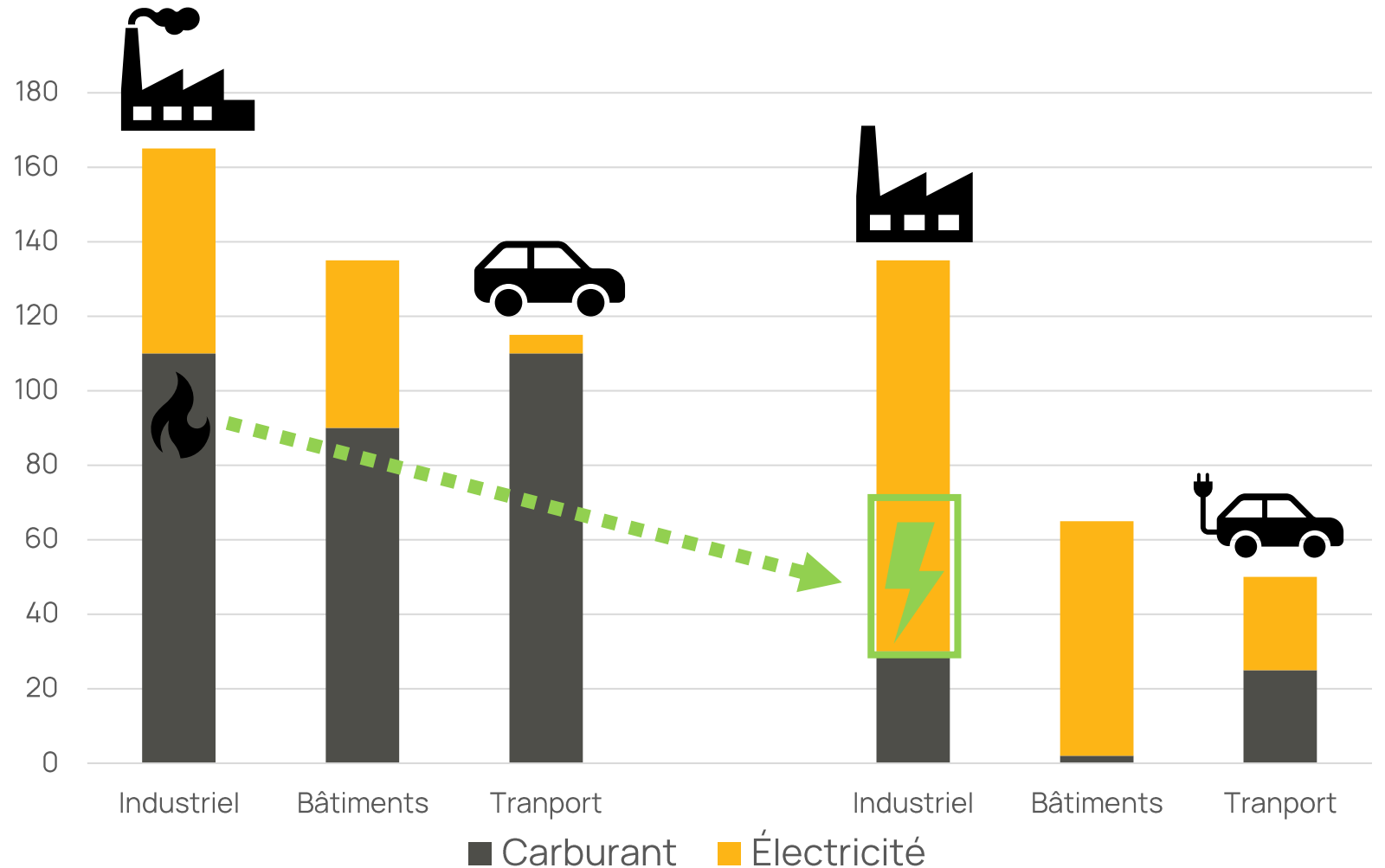
Thermopompes & MVR
max $\pm 150^{\circ}\text{C}$ (selon source)
COP 2x à 10x

Efficacité et
intégration thermique
= Énergie « gratuite » !

Décarbonation du chauffage industriel

- L'électrification efficace réduira la consommation des transports et bâtiments...mais pas autant pour le secteur industriel!
- Le chauffage de procédé deviendra le plus grand consommateur d'électricité dans un monde carboneutre

Utilisation énergétique mondiale par secteur et type de source : actuel et post-transition



Décarbonation du chauffage industriel



Today's Energy Economy (PWh/year)

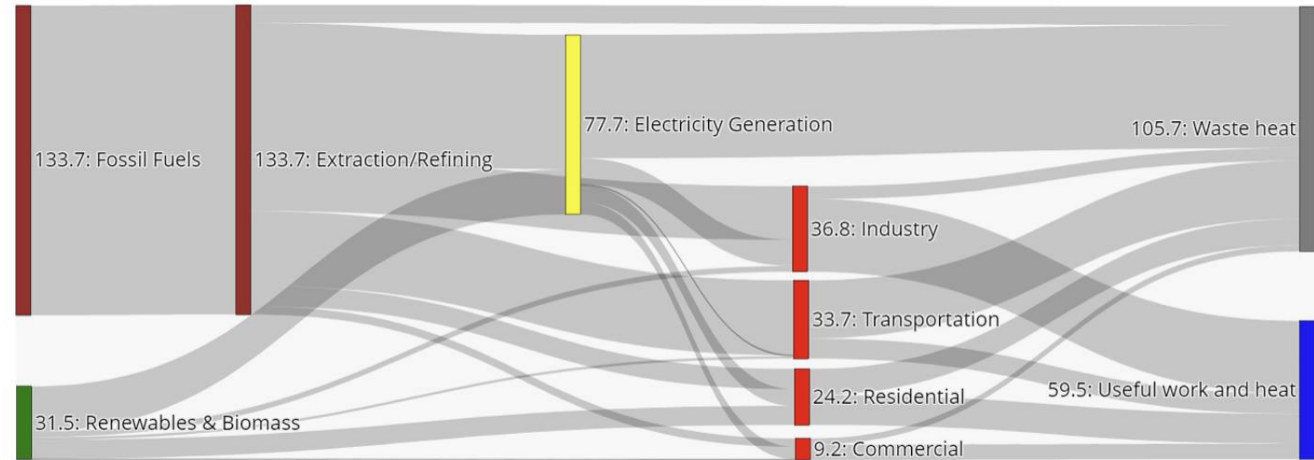


Figure 3: Global Energy Flow by Sector, IEA & Tesla analysis

Sustainable Energy Economy [PWh/year]

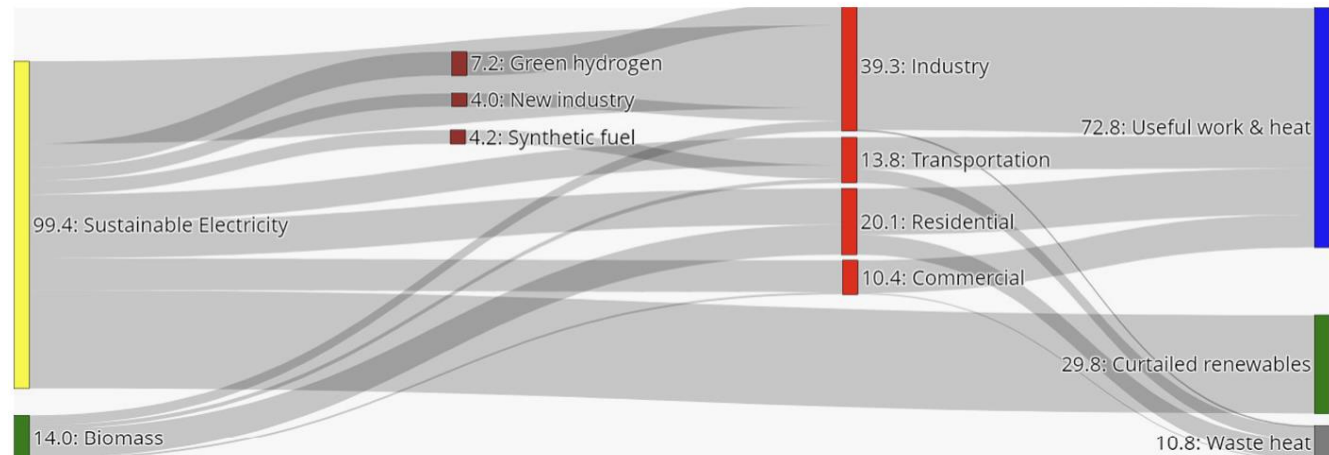


Figure 15: Sustainable Energy Economy, Global Energy Flow by Sector, IEA & Tesla analysis

Décarbonation du chauffage industriel

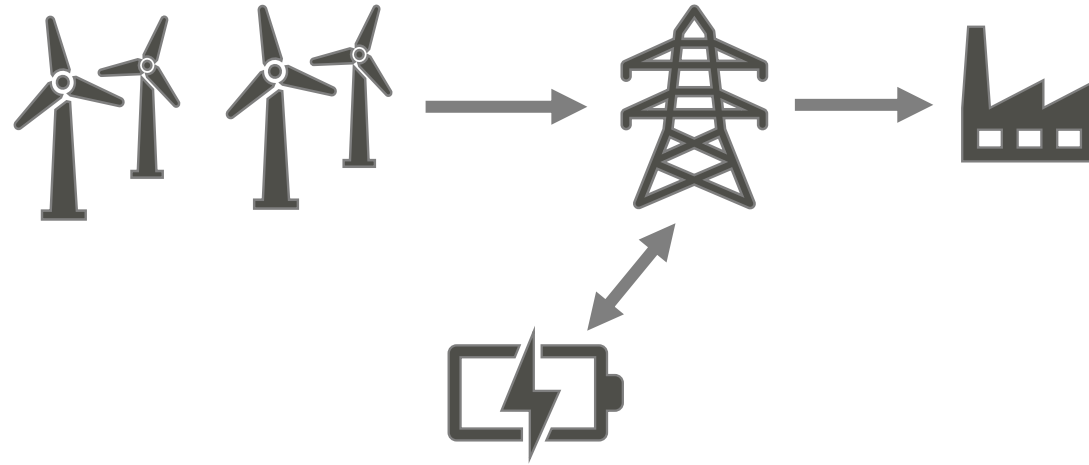
Alternatives (complément) à l'électrification:

- + **Efficacité et récupération!** (on ne peut jamais le dire assez)
- + **Gaz naturel de source renouvelable:** essentiel, mais quantités limitées (< 10% de la conso actuelle)
- + **Biomasse forestière:** régionale, quantités limitées, moins modulable
- + **Solaire thermique:** saisonnier; coût comparable au photovoltaïque
- + **Captage de CO₂:** une dépense énergétique supplémentaire...
- + **Hydrogène:** un vecteur, mais pas une source!

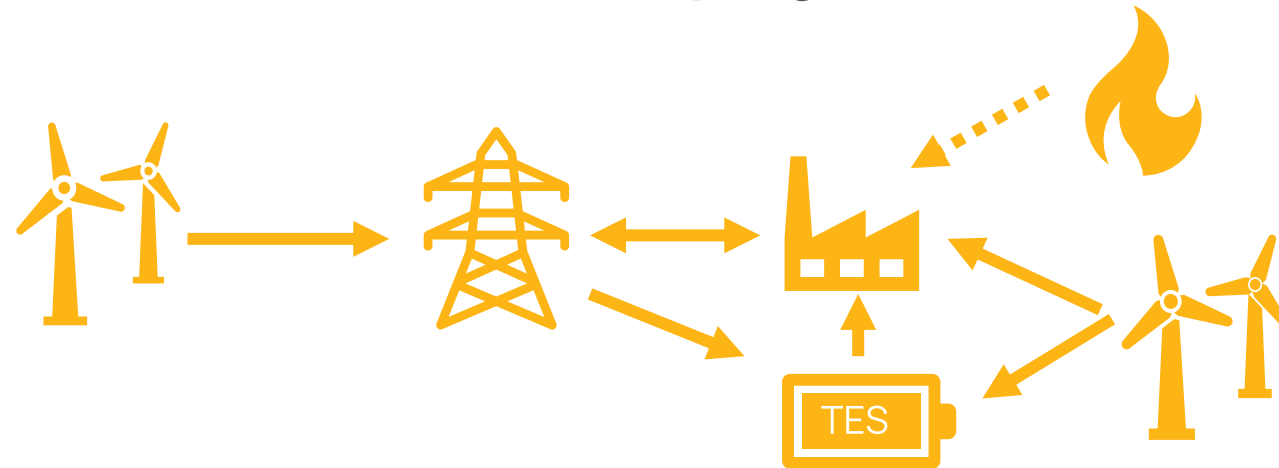
Décarbonation du chauffage industriel

L'opportunité du
couplage sectoriel

Électrification « en silo »

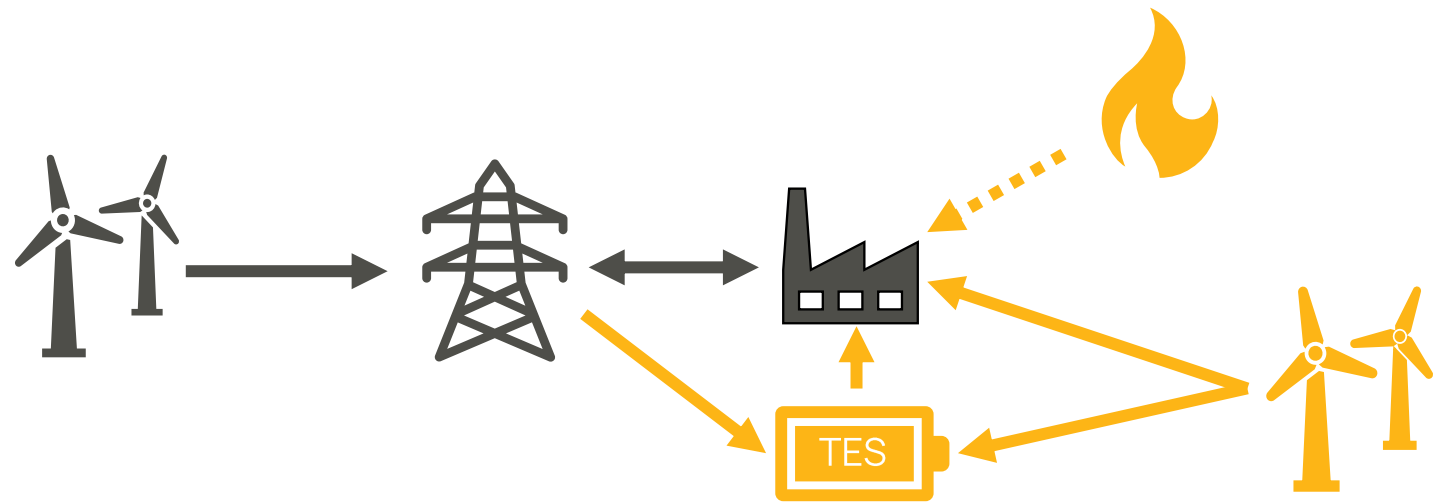


Électrification avec couplage sectoriel



Décarbonation du chauffage industriel

L'opportunité du
couplage sectoriel



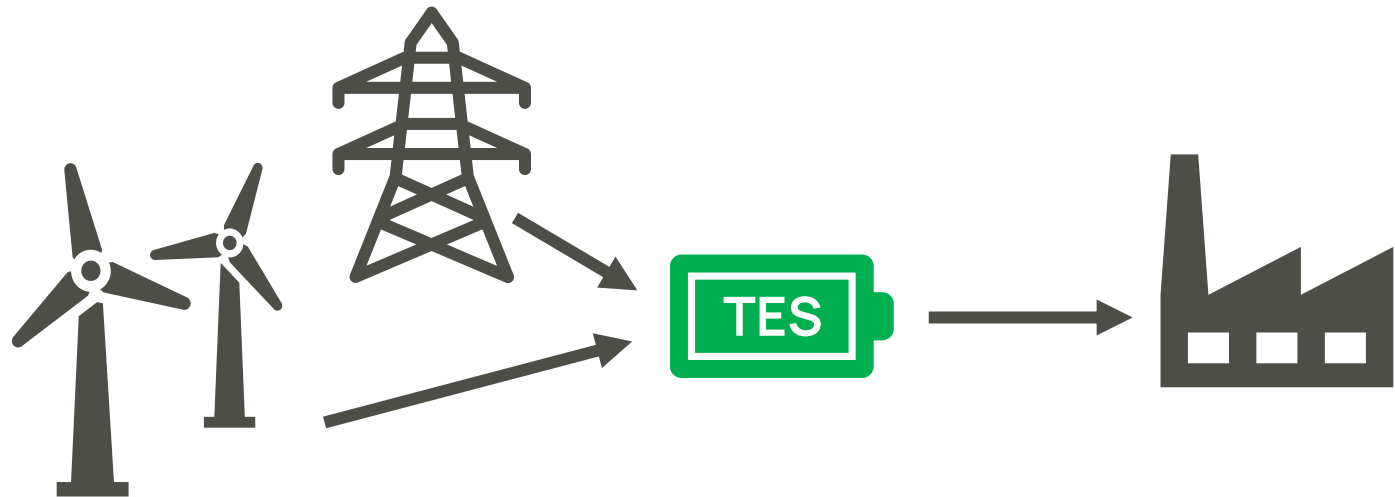
Les charges thermiques **fourniront la flexibilité** au réseau électrique:

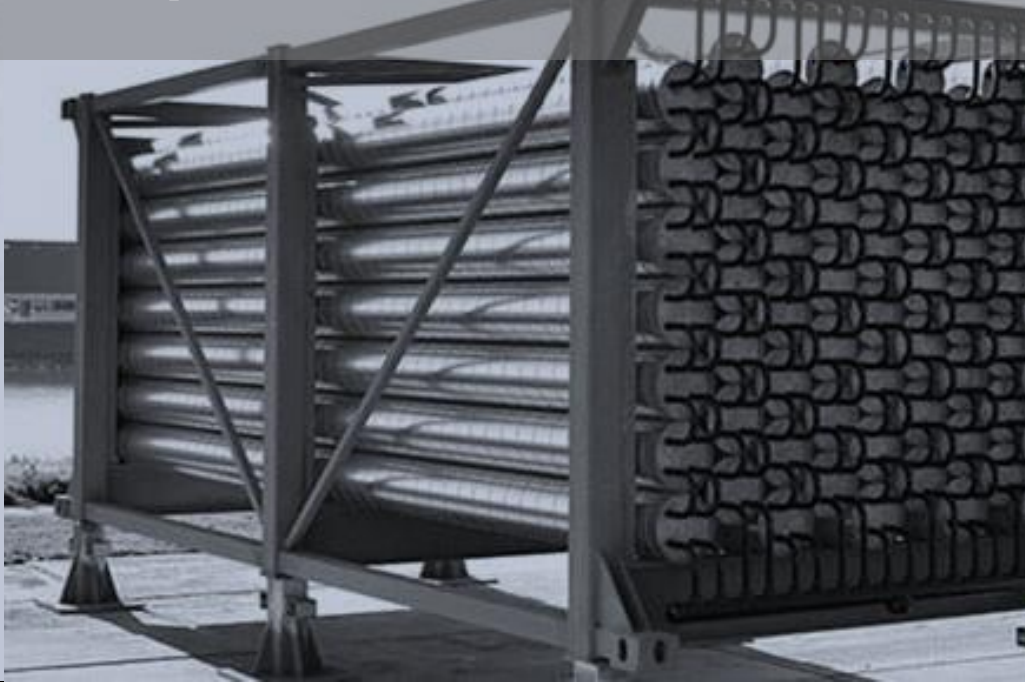
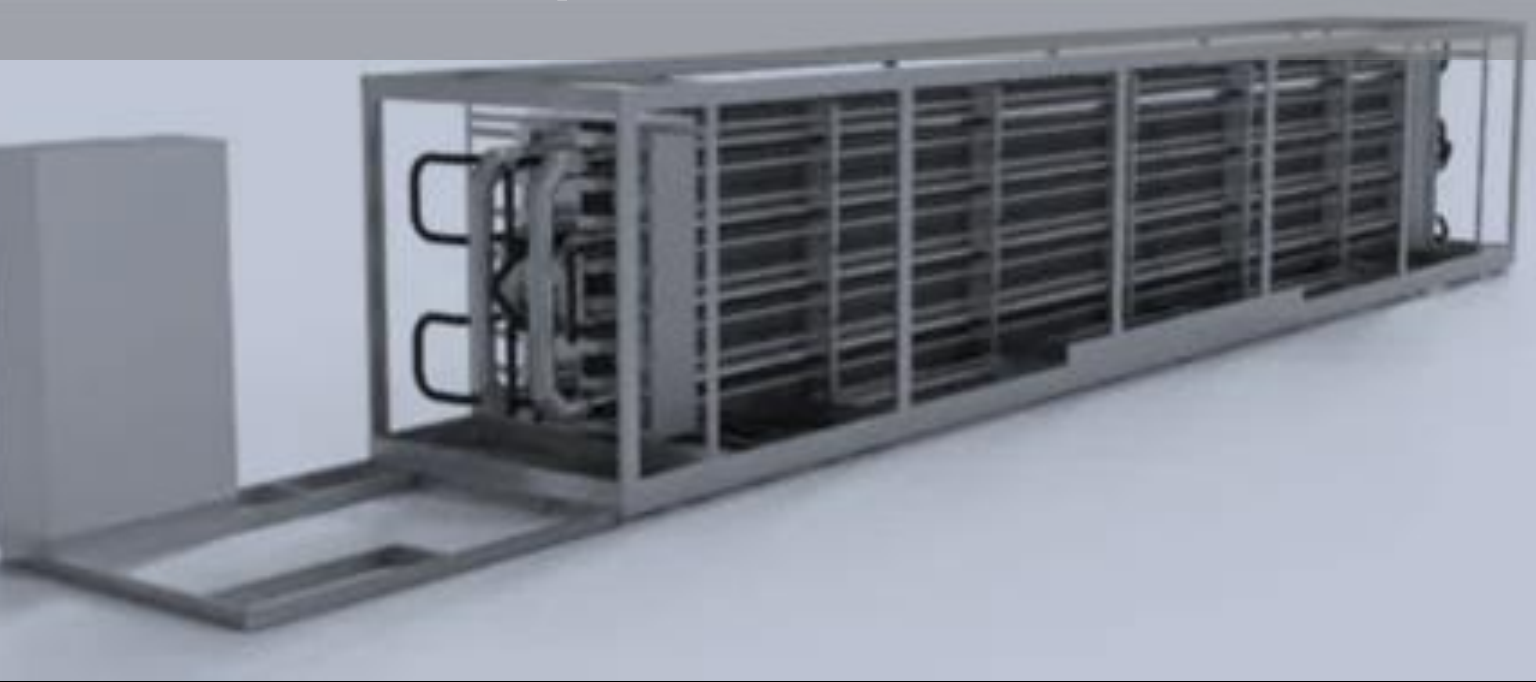
- En basculant aux carburants d'appoint
- Avec le stockage thermique *power-to-heat*

Décarbonation du chauffage industriel

Des cas de figure
pour le couplage
sectoriel et le
stockage thermique

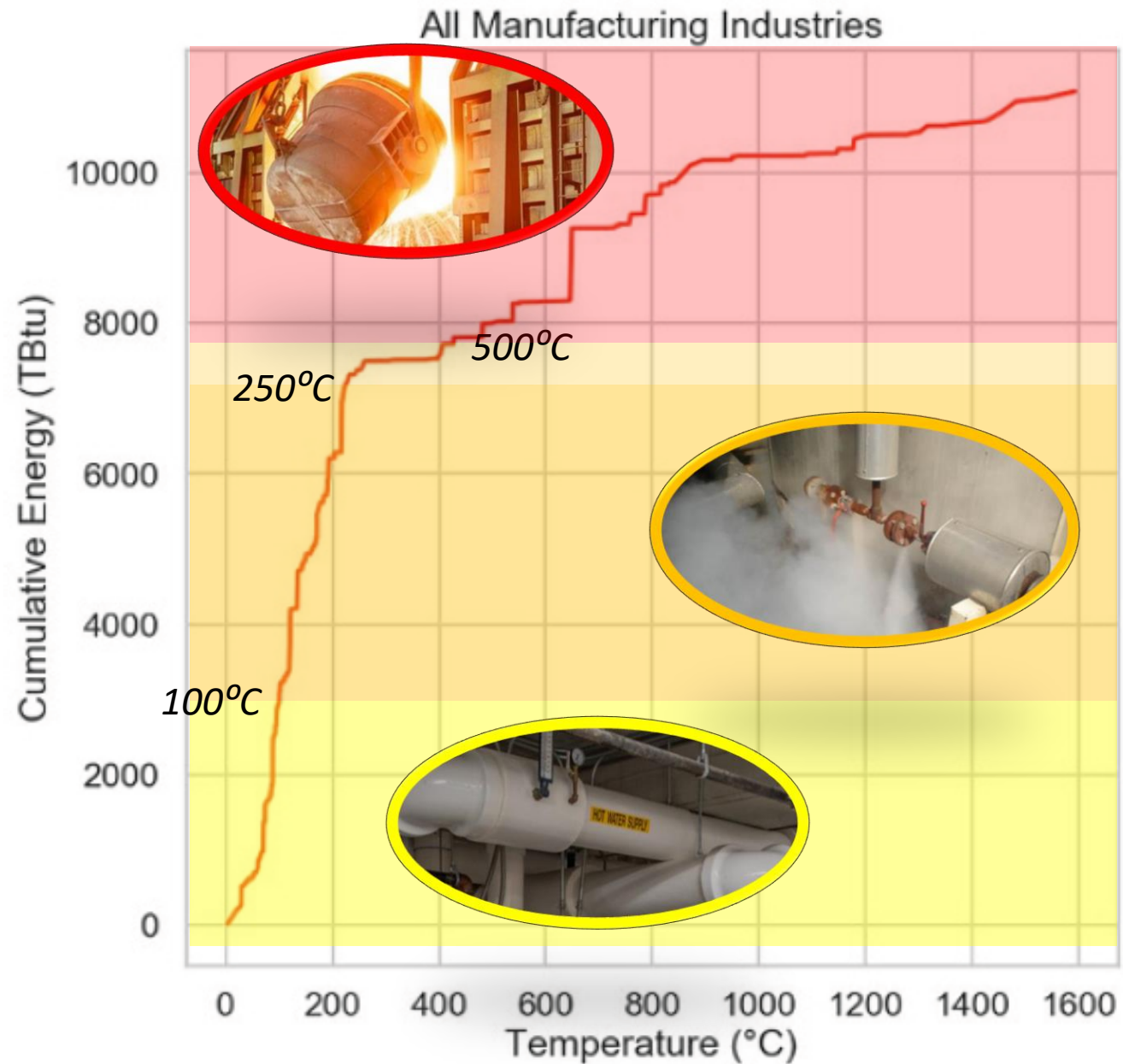
- Nécessité de raccorder le chauffage de procédé au réseau électrique pour décarboner
- Pour la moyenne à haute température: 1 kWh électrique → 1 kWh de chauffage
- Le stockage thermique est moins cher que les batteries électriques → meilleure solution pour le stockage journalier

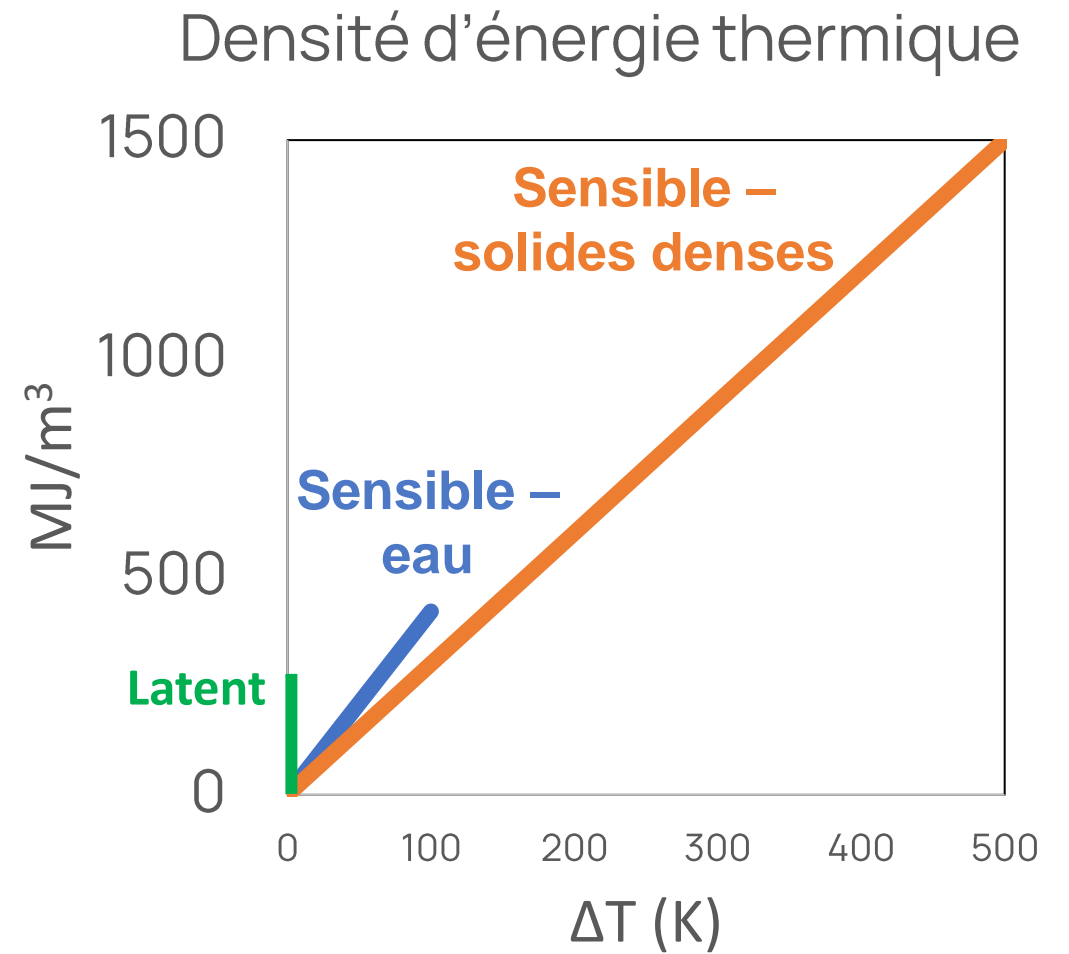
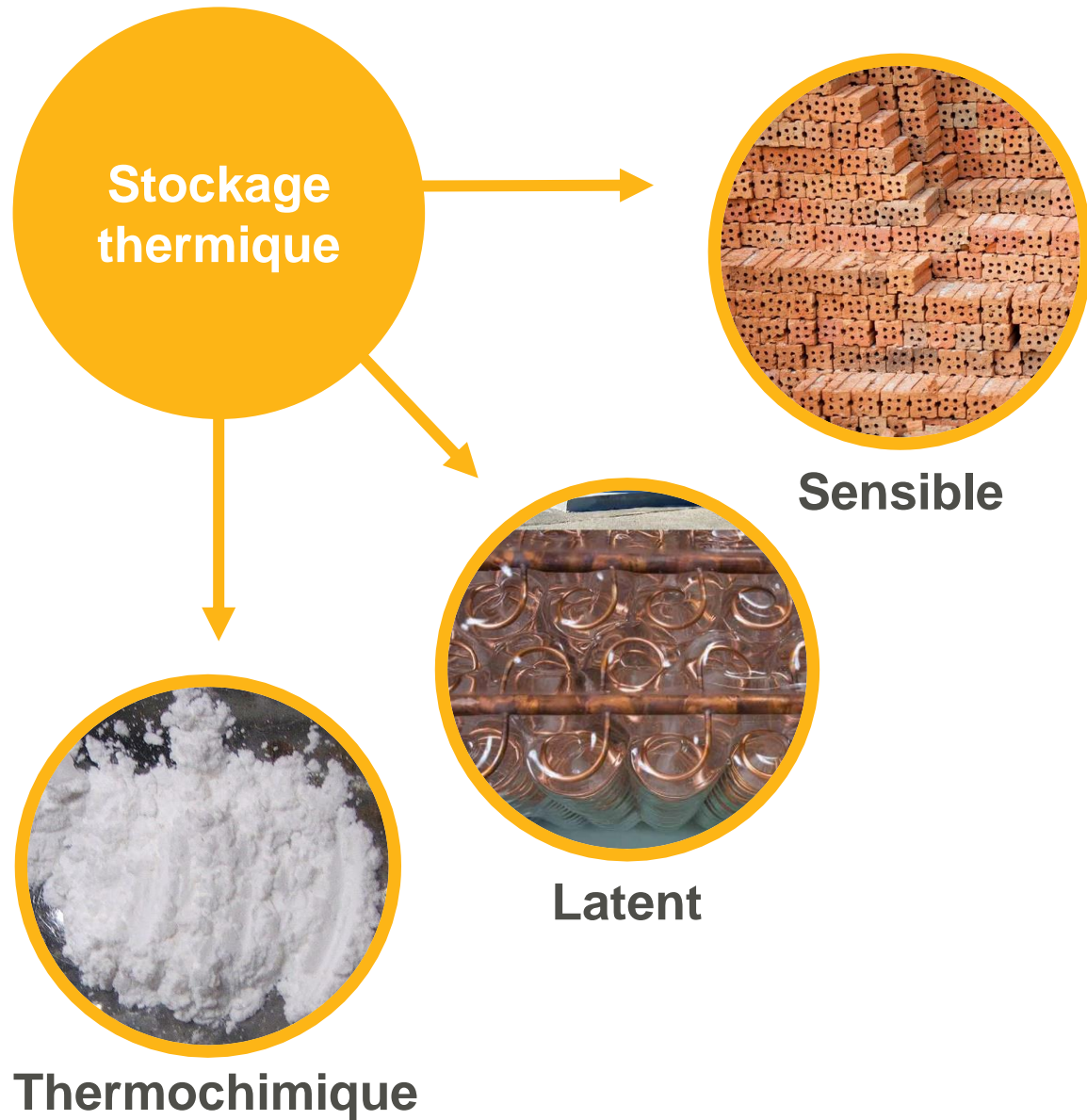




Températures ciblées

- « Sweet spot » 100°C – 300°C
- À plus haute température, le coût de stockage augmente
- À plus basse température, les alternatives de récupération de chaleur se multiplient





Stockage thermique sensible



Solides

- Roche
- Céramiques
- Béton



Échangeur intégrée



Liquides

- Eau
- Huiles calorifiques
- Sels fondus



Régénérateur

	Cp [J/kg-K]	Densité [kg/m3]	ΔT [K]	Densité de stockage [kWh/m3]
Eau	4200	1000	50	58
Sels nitrates	1500	1800	300	225
Béton	900	3000	250	188
Roche	900	3000	500	375
Céramique	900	3500	750	656

LIQUIDES - SELS FONDUS

- Établis dans les centrales solaires thermiques à très grande échelle
- Commercialisation d'un système *power-to-heat* par Kyoto Group
- Facilité de transfert de chaleur avec liquide caloporteur
- Défis avec gels, fuites, limites de température (max 450-600°C)



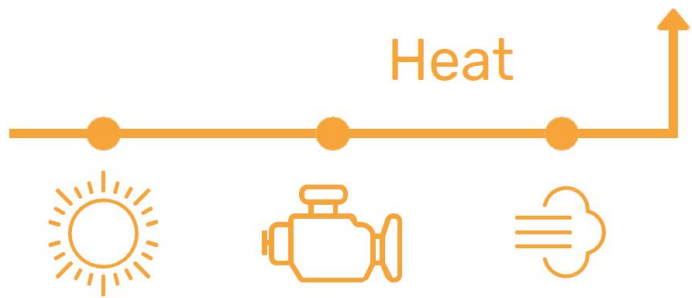
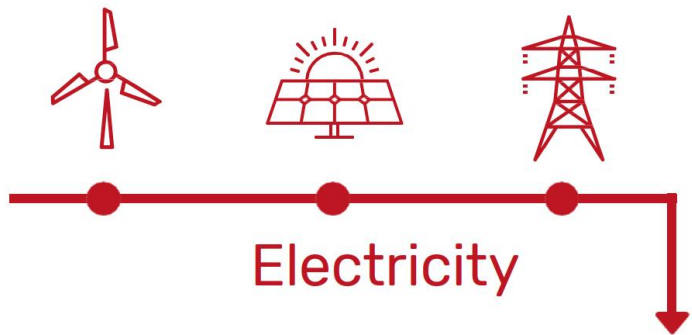
Kyoto Group



SOLIDES - ÉCHANGEUR INTÉGRÉ

- Plusieurs en commercialisation
 - EnergyNest: formulation de béton thermique, max $\sim 400^{\circ}\text{C}$
 - BrenMiller: modules en acier avec roche concassée, max $\sim 700^{\circ}\text{C}$
 - Calderra: caloduc dans un matrice de roche et aluminium
- L'échangeur intégrée extensive est \rightarrow coût additionnel, mais simplifie le système.





Brenmiller Energy

SOLIDES - TYPE « RÉGÉNÉRATEUR »

- Comparable au régénérateur "Cowper" de aciéries
- Air soufflé à travers un solide poreux pour transférer l'énergie
- Rondo Energy: céramique avec éléments électriques intégrés
- Kraftblock, Eco-Tech Ceram: chauffage électrique externe, transfert via air dans un lit de céramique
- Max temp >>1000°C
- Peut aussi servir à la récupération

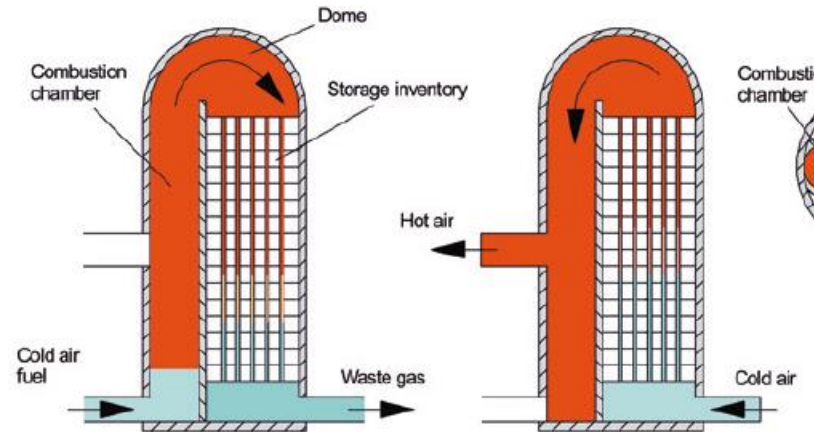
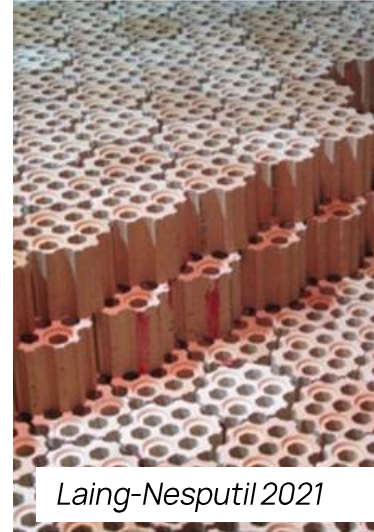


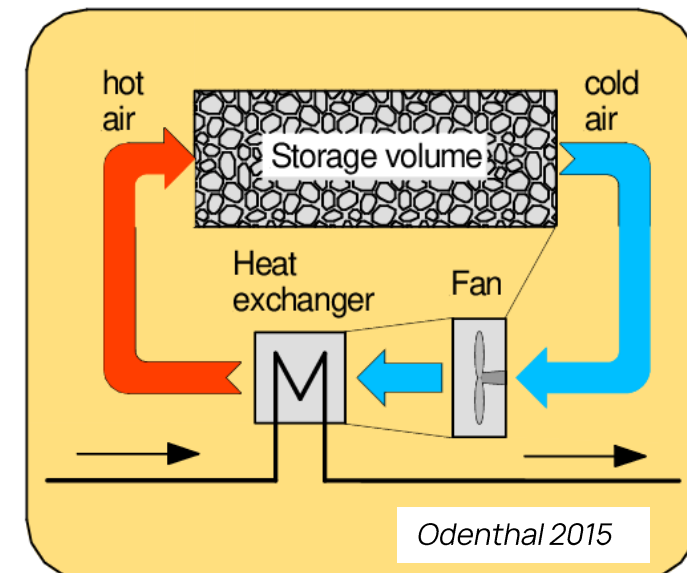
Fig. 3.10 Schematic of a Cowper stove with internal combustion chamber, charging cycle and cross-sectional view (right) Steinmann 2022



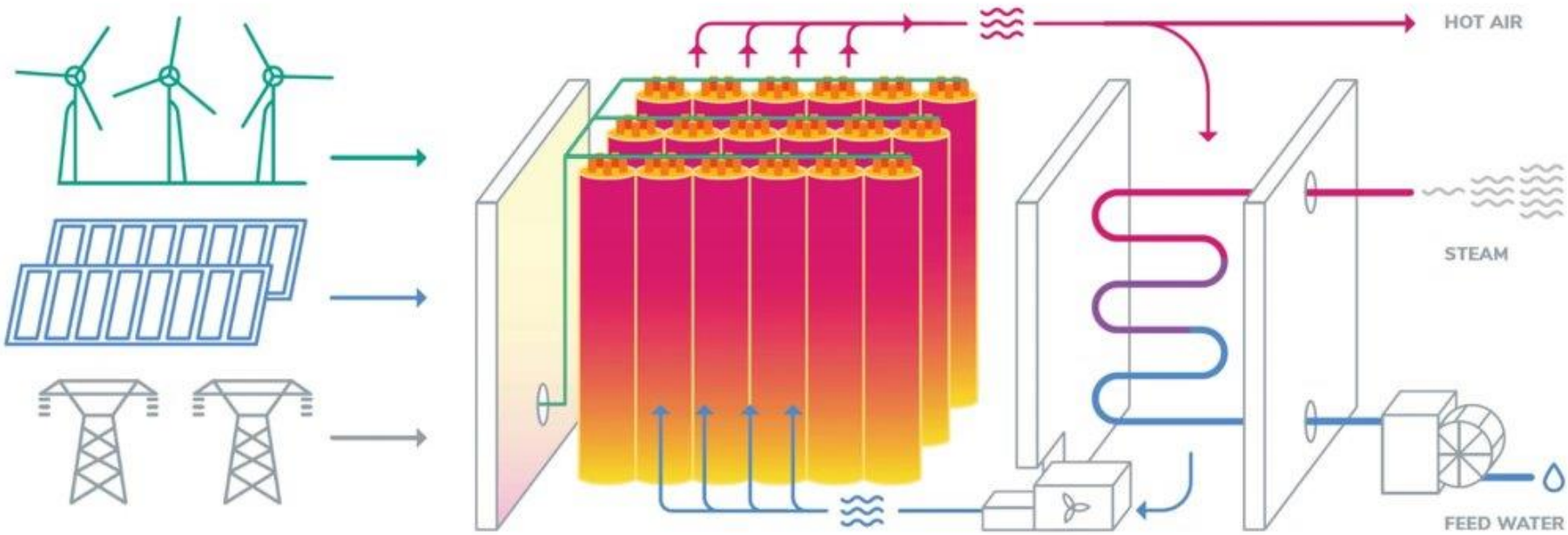
Laing-Nesputil 2021



Kraftblock



Odenthal 2015



Rondo Energy

Performance

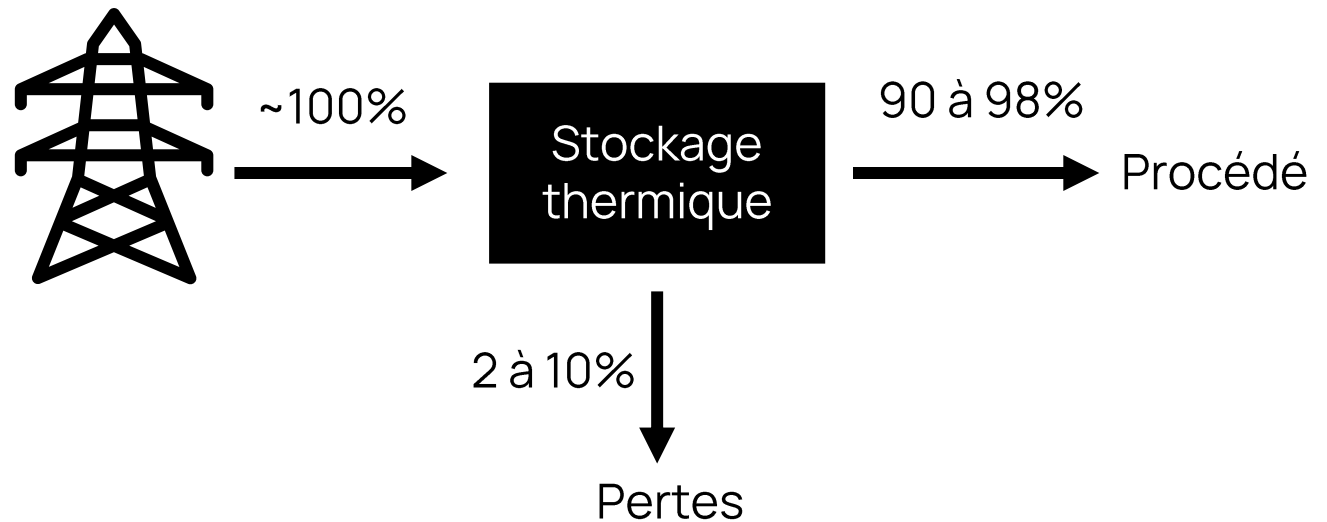
Capacité

- De quelques MWh à des centaines de MWh (100's de KW à 10's de MW)
 - Certaines prévoient des plus petits modules aussi (ex. Caldera)
- Densité comparable aux batteries, $\sim 200 \text{kWh}_t/\text{m}^3$

Performance

Capacité

- Conversion 100% électricité → chaleur
- Pertes dues essentiellement à l'enveloppe → dépendent du volume et de la durée des cycles
- $\eta > 90\%$ avec pleine utilisation sur cycles journalières



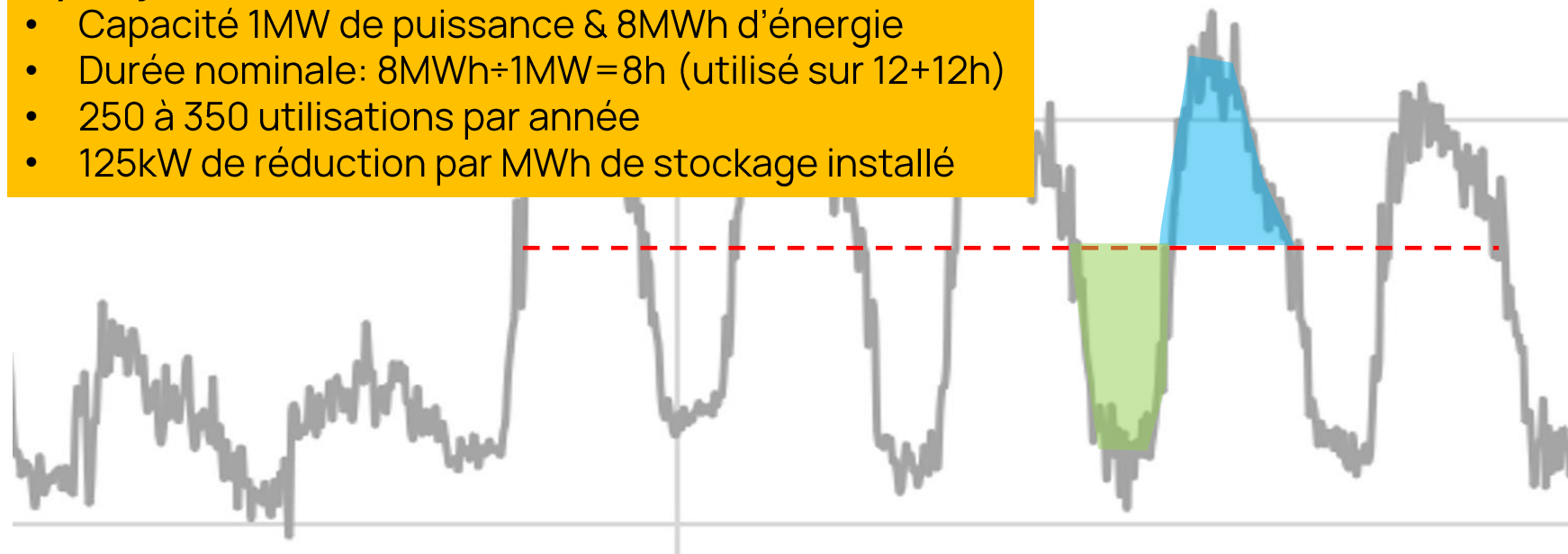
Performance

Durée, puissance et cycles

- Plusieurs façons de décrire la même information
- Une « durée » plus longue n'est *pas* un atout en soit – mais pourrait réduire le \$/kWh

Cycle journalier

- Capacité 1MW de puissance & 8MWh d'énergie
- Durée nominale: $8\text{MWh} \div 1\text{MW} = 8\text{h}$ (utilisé sur 12+12h)
- 250 à 350 utilisations par année
- 125kW de réduction par MWh de stockage installé



Cycle hebdo

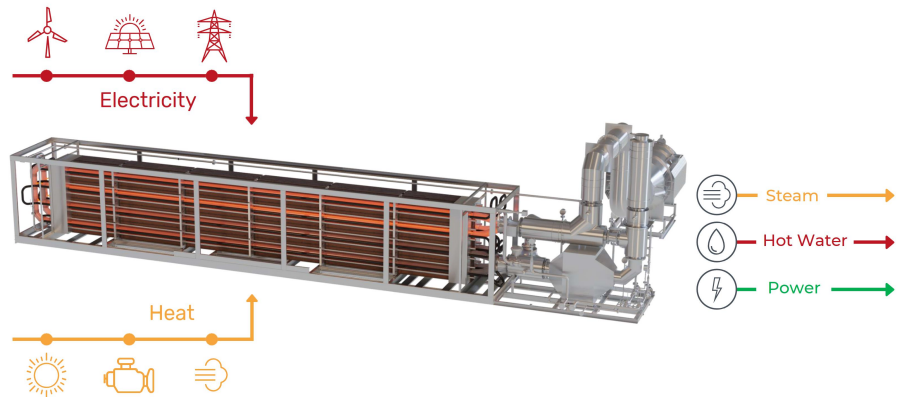
- 0,5 MW charge / 0,2MW décharge / 24 MWh d'énergie
- Durée nominale: $24\text{MWh} \div 0.5\text{MW} = 48\text{h}$ (utilisé sur 2+5 jours)
- 50 utilisations par année
- 8kW de réduction par MWh de stockage installé



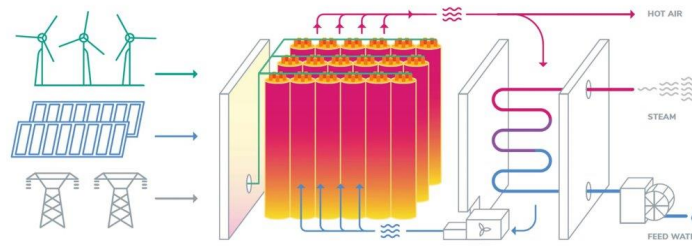
Performance

Durée & puissance

- Puissance max ~ 3h
- 4 à 15h typique décharge
- Couplé vs. découplé:



Brenmiller Energy- couplé



Rondo - découplé

Coûts

- Premières estimations à 100\$/kWh pour l'équipement
→ ~200\$/kWh installé
 - Vs. batteries 300 à 600\$/kWh derrière le compteur
- Prévisions d'atteindre à terme < 100\$/kwh *installé*


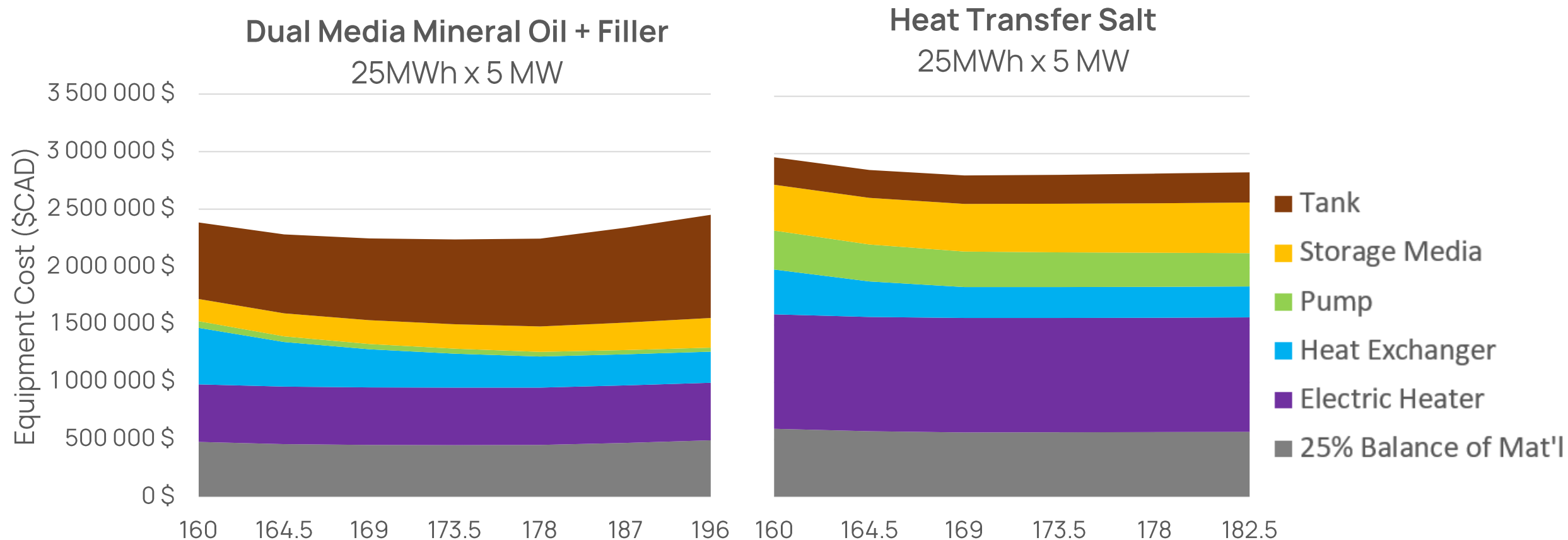
Storage	Technology	2030-2040 Installed Cost ^p	O&M Cost (/kW-yr)	RTE	Annual Cycling Limit	Lifetime	Technical Potential (limitation)
Mechanical	Thermal (15h)	\$78/kWh ^r	\$15.00 ^q	95% ^r	NA	20 years ^r	
-	Pumped Hydro	>\$270/kWh ³⁶	\$17.80 ⁴⁴	80% ⁴⁴	NA	100 years	
-	Seasonal Hydro (~2mo)	NA	NA	-	-5.7 (in-flow limited)	100 years	
E-chem	Li-ion (4h-8h)	\$184-\$231/kWh ^r	\$0.80 ³⁸	95% ^r	365 ^r	20 years ^r	
H ²	Geological/ Salt Caverns	\$19/kg of H ² ³⁹	NA	98%	NA	50+ years	

Table 4: Energy Storage Technologies Evaluated

Coûts

- Modélisation de coûts à McGill → 100\$/kWh pour équipement, avec potentiel de réduction

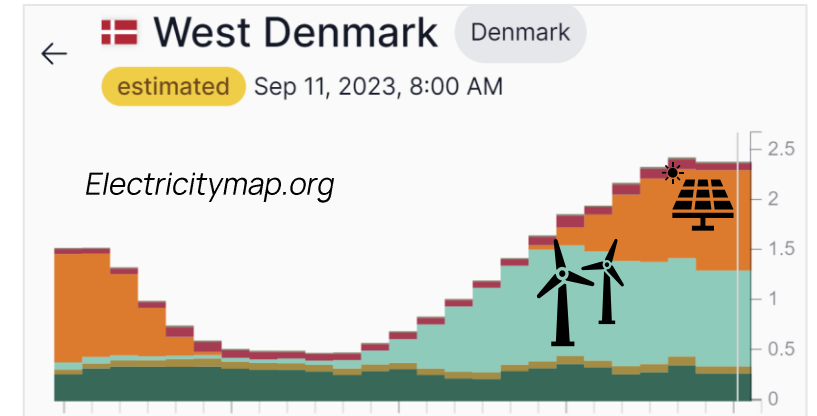
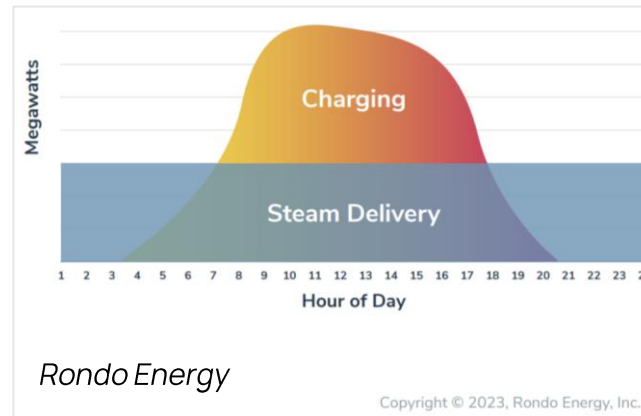
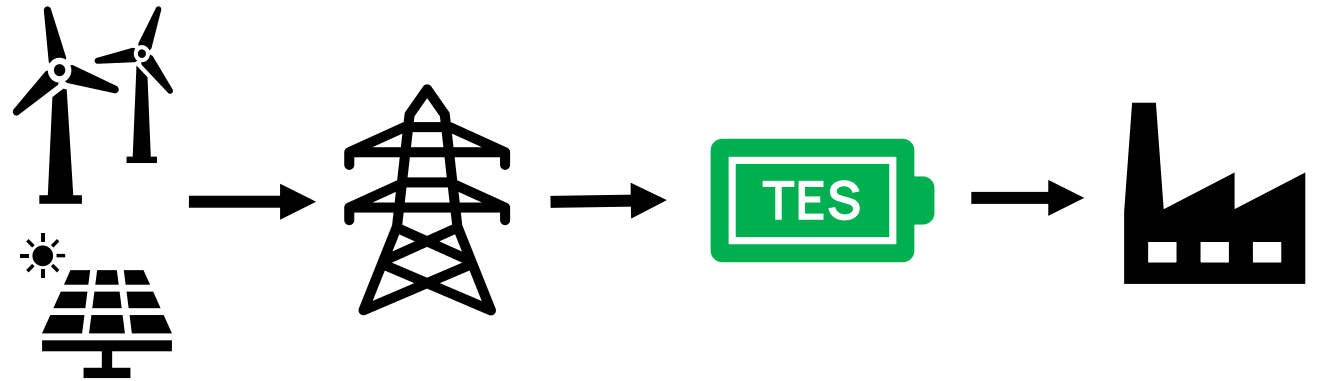


An aerial photograph of an industrial complex. In the foreground, there are several long, parallel rows of solar collectors (solar towers) mounted on a hillside. The middle ground shows a large industrial building with a flat roof, surrounded by parking lots and other smaller structures. In the background, there are more industrial buildings and several wind turbines. The sky is clear and bright.

Applications de stockage thermique « power-to-heat »

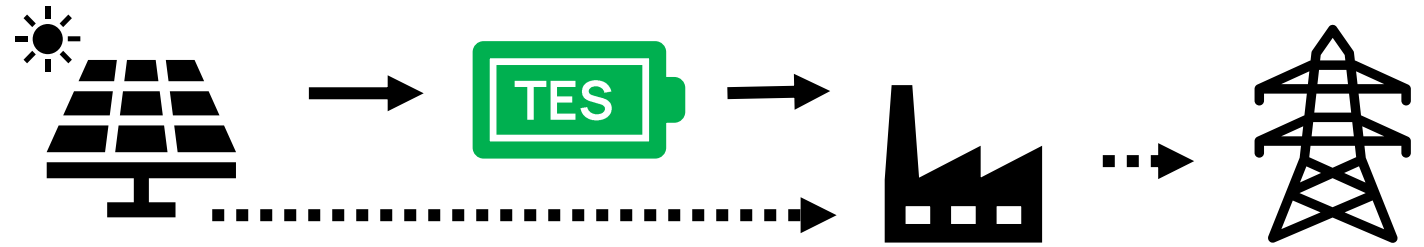
ÉLECTRICITÉ VARIABLE SUR LE RÉSEAU

- Chargement du stockage selon le prix d'électricité sur le réseau
- Exemples
 - Rondo Energy: vapeur pour une usine d'éthanol aux É-U
 - Kyoto Group: chaleur pour un réseau thermique danois.
- Décharge selon la demande de procédé



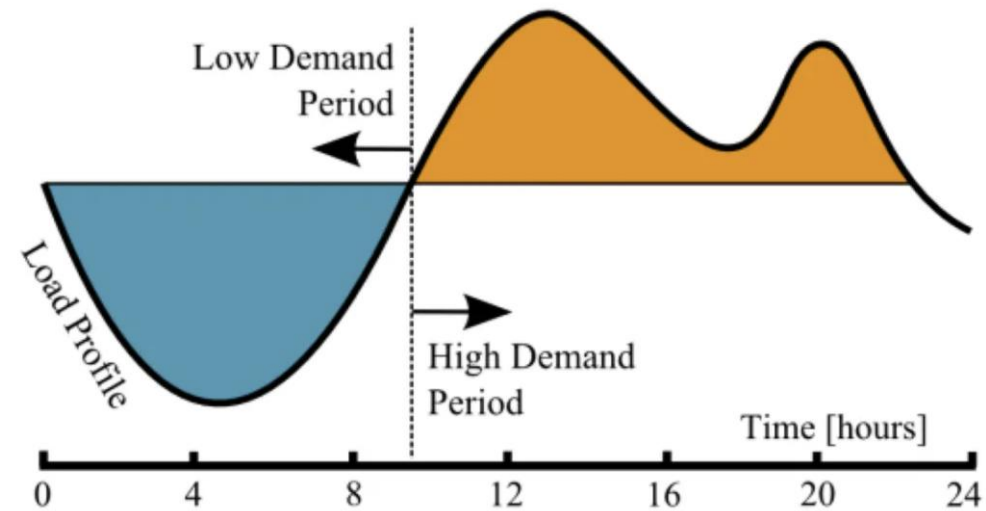
INTÉGRATION D'ÉNERGIE RENOUVELABLE DERRÈRE LE COMPTEUR

- Chargement du stockage avec solaire thermique, solaire PV et/ou éolienne sur le site
- Prioriser exportations quand le prix du réseau est élevé
- Exemple - EnergyNest – stockage pour solaire thermique pour site industriel en Belgique



APLATIR OU TRANSFÉRER UNE DEMANDE VARIABLE

- La variabilité peut aussi venir du *consommateur* d'énergie
 - Quarts de travail
 - Procédés en batch
- Le stockage peut aplatir et/ou transférer la demande



Energies via vox.com

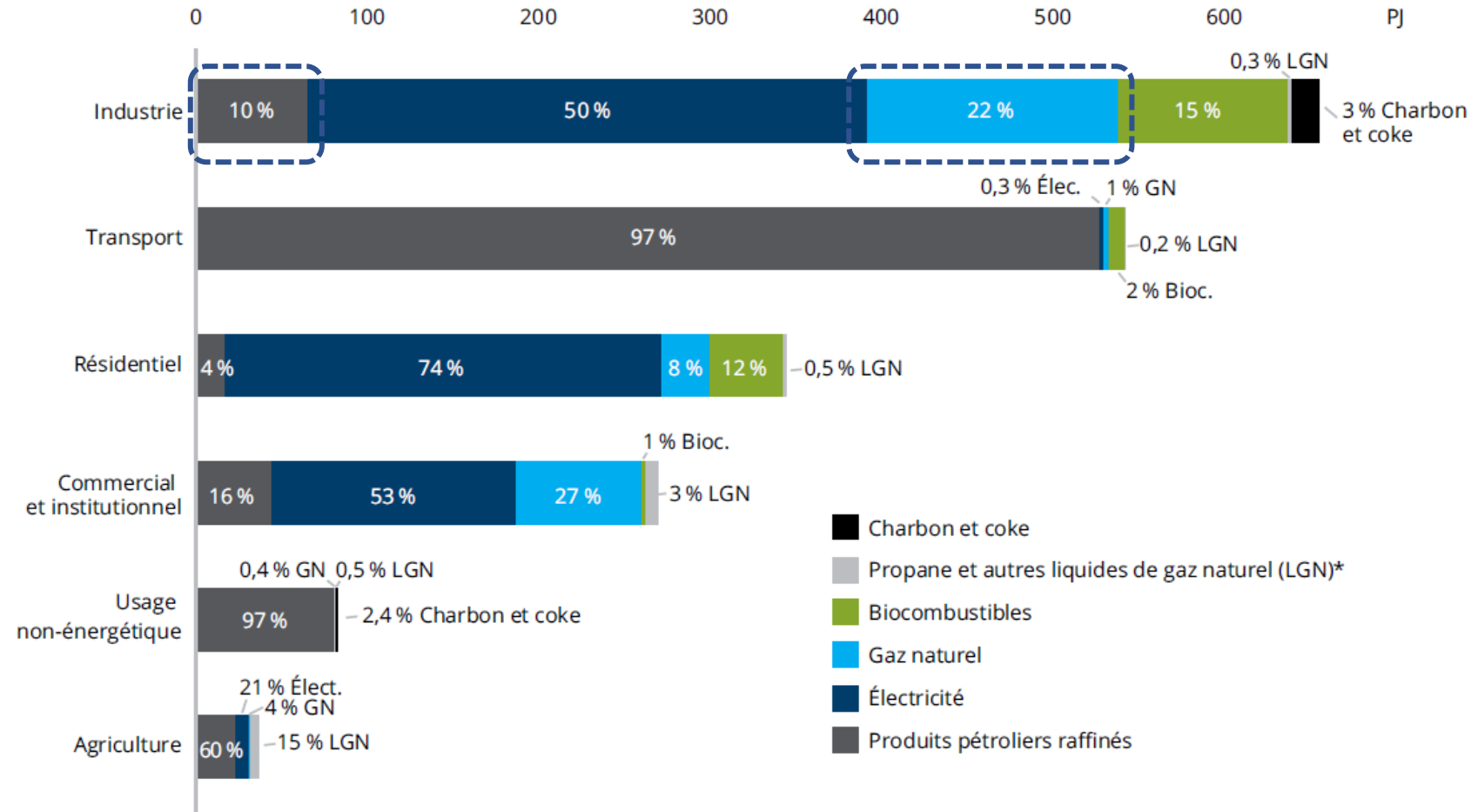


Applications sur le marché québécois

Décarbonation industrielle au Québec

- 200PJ/an chauffage fossile industriel = 5 à 6 GW

GRAPHIQUE 22 • CONSOMMATION DE DIFFÉRENTES FORMES D'ÉNERGIE PAR SECTEUR D'ACTIVITÉ AU QUÉBEC, 2020

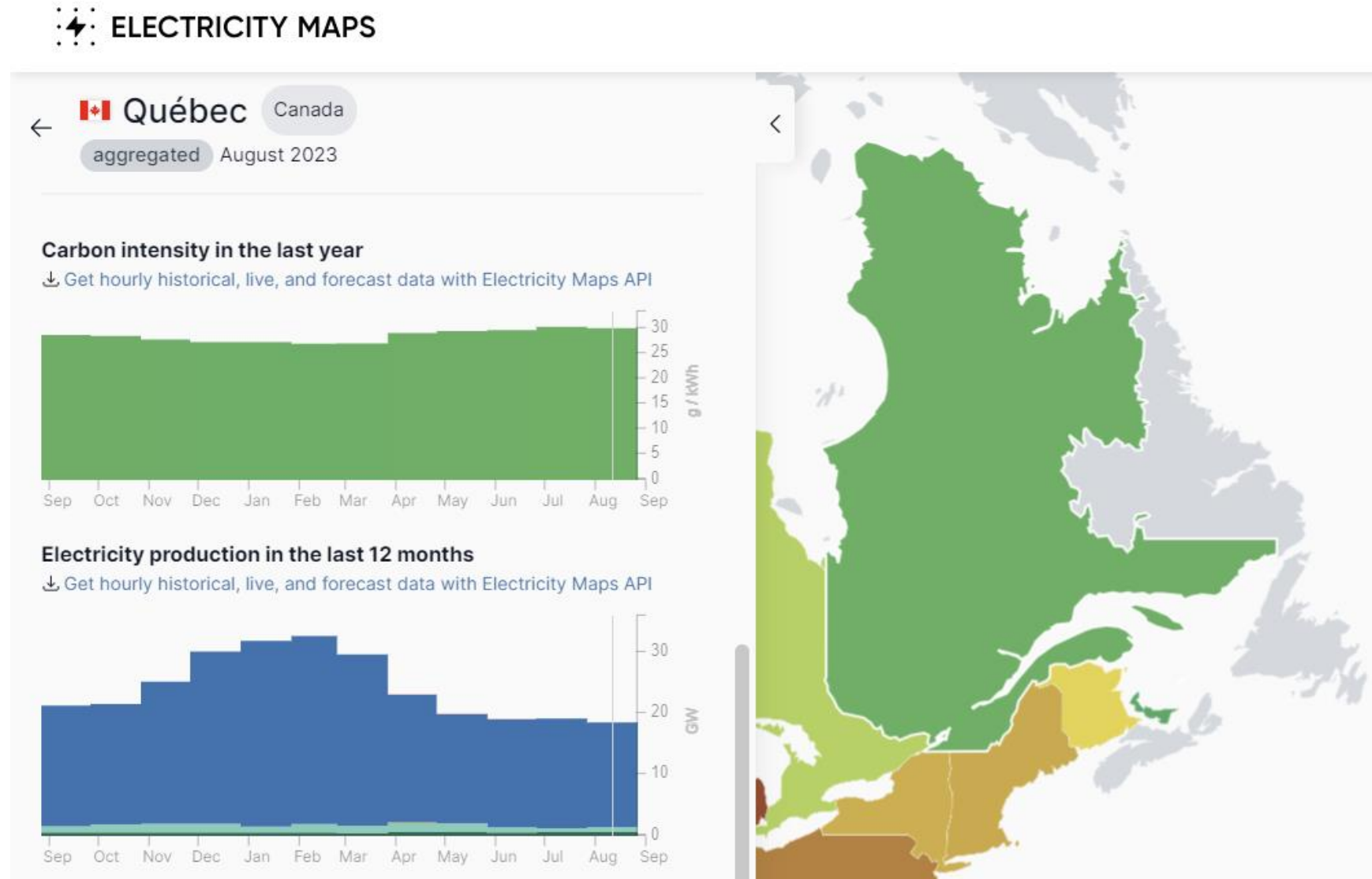


Sources : Statistique Canada, 2022 (tableau 25-10-0029-01); Navius, 2022; MERN, 2022 (communication personnelle).

Note : La catégorie « liquide de gaz naturel » inclut le propane et le butane.

Décarbonation industrielle au Québec

- Stockage d'énergie quasi-illimité dans les barrages
- Contraintes de puissance seulement pour quelques journées froides



Implications pour les applications de stockage au Québec

- + Peu d'intérêt d'ajouter du stockage pour suivre les variations de l'éolienne; les barrages ont déjà la capacité
- + Ailleurs, il est pertinent de stocker la *production d'énergie variable* pour fournir un procédé stable...
- + ...au Québec, le stockage servira plutôt pour aplatir la demande énergétique des *procédés variables* pour réduire les besoins d'investissements en transmission & distribution

Stockage et pointes saisonnières

- Dans le résidentiel, on mise en partie sur le stockage pour aplatir les pointes du réseau
- En industriel, les équipements redondants à combustible sont *déjà* présents → moins d'intérêt pour un équipement supplémentaire



Exemple

Surcout GNR d'appoint: 10¢/kWh

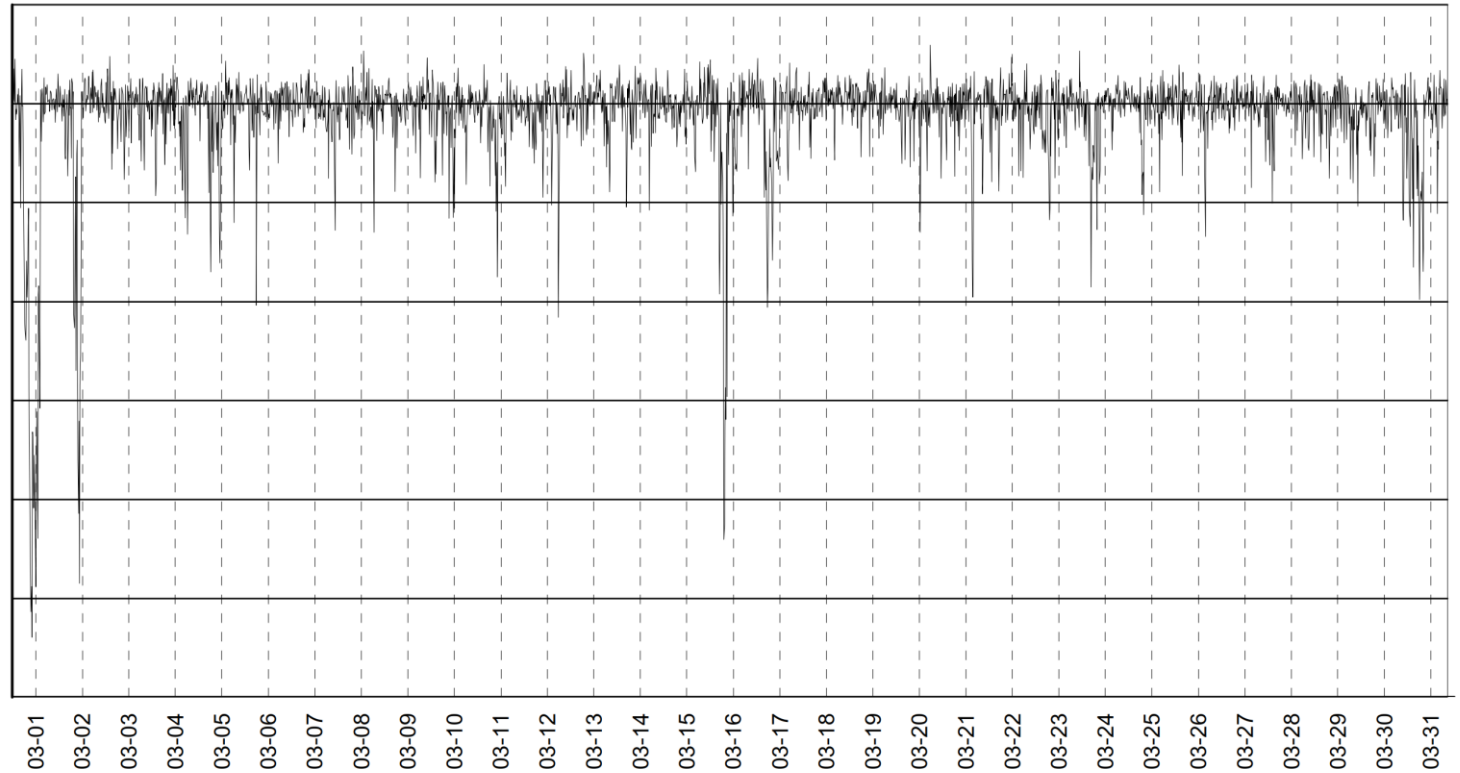
CAPEX stockage: 200\$/kWh

Évènements de délestage: 30/an

PRI sur stockage pour pointes saisonnières seulement: 67 ans

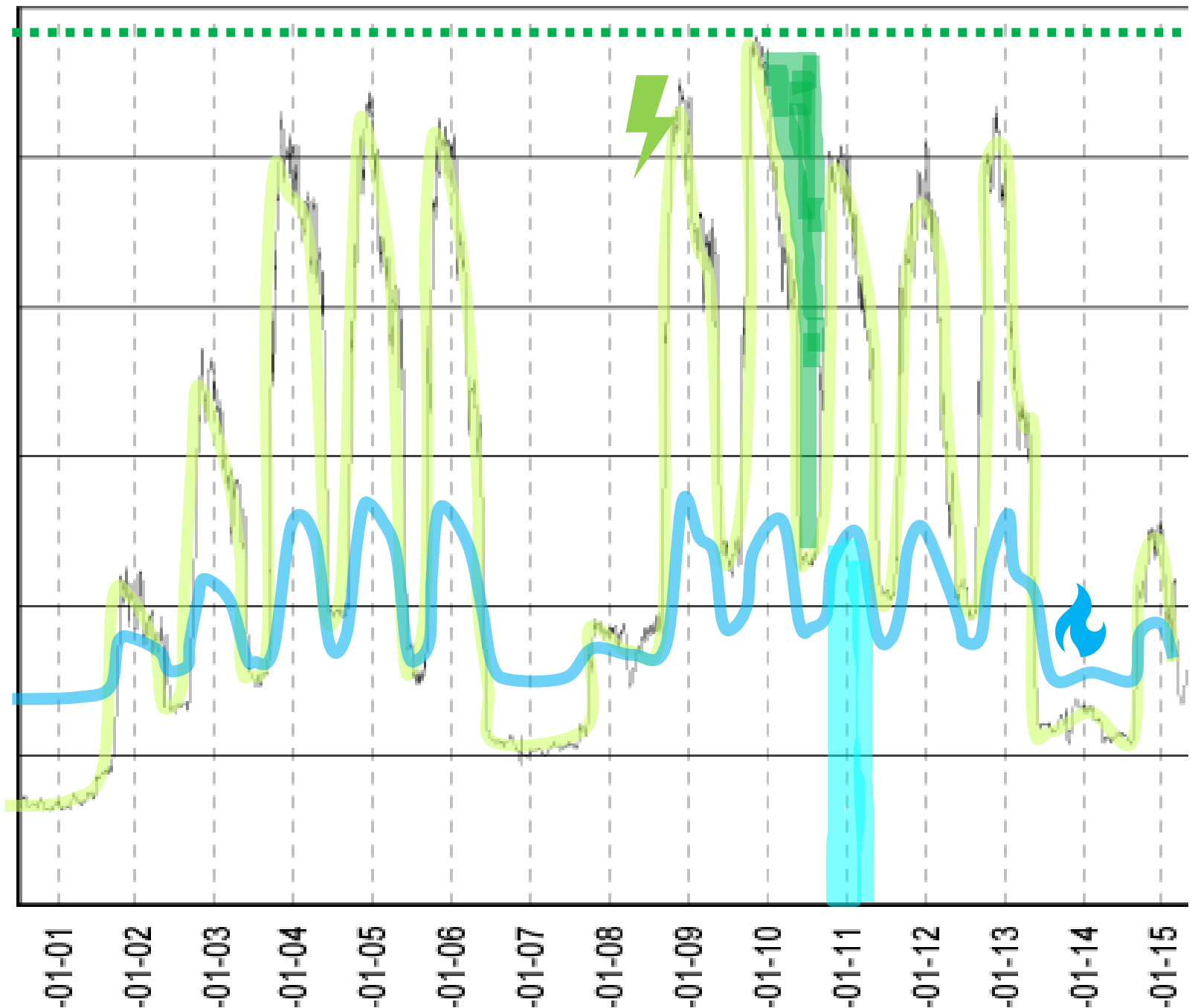
**Procédés en
continus:
moins de
potentiel pour
le stockage**

- Les carburants d'appoint seront plus appropriés pour un délestage *occasionnel* lors des pointes saisonnières



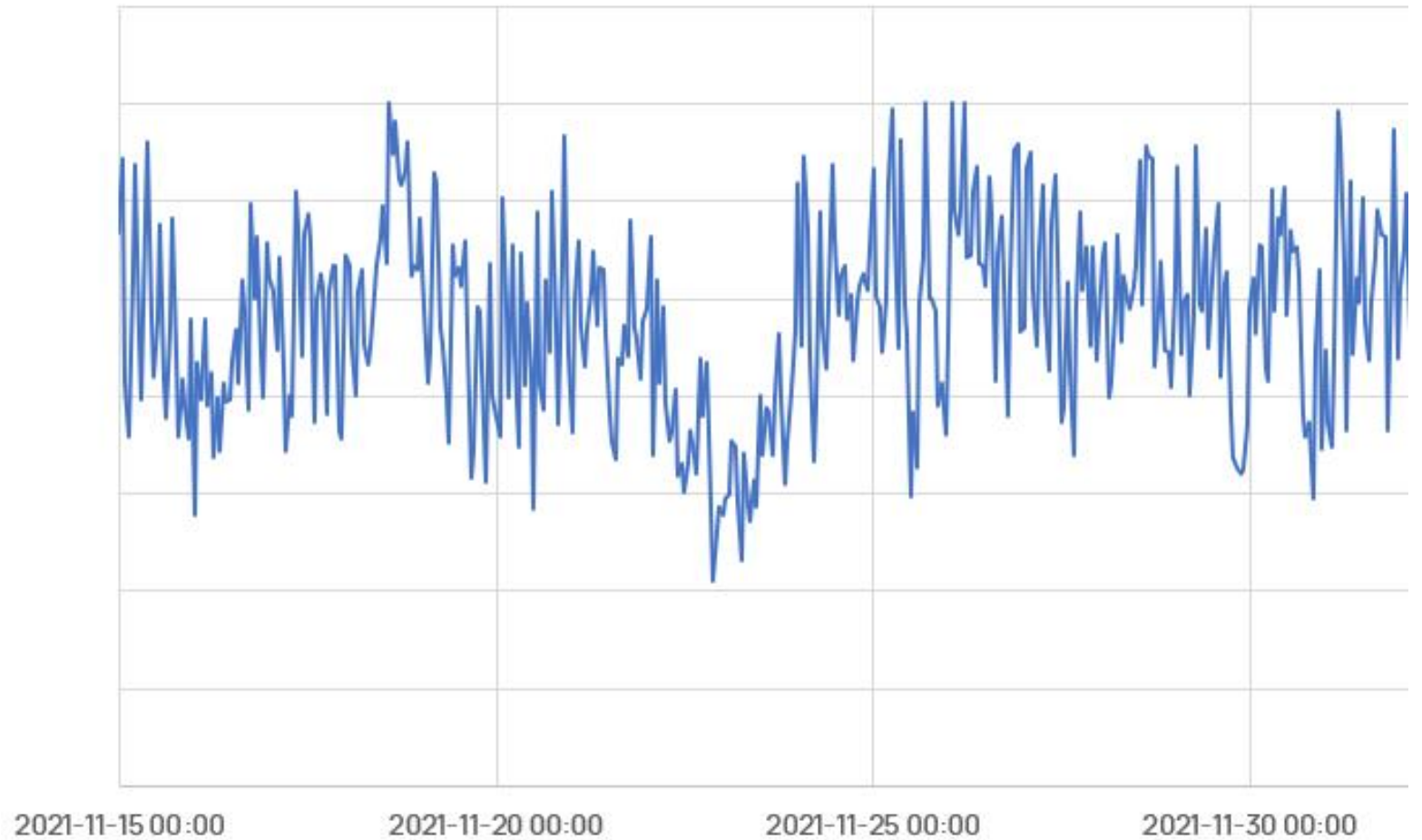
Opération journalière

- Application idéale et intuitive pour le stockage
- Chargement du stockage la nuit, « hors-pointe », moins cher que combustible
- Déchargement pour les besoins thermiques pendant la production



Opération en batch

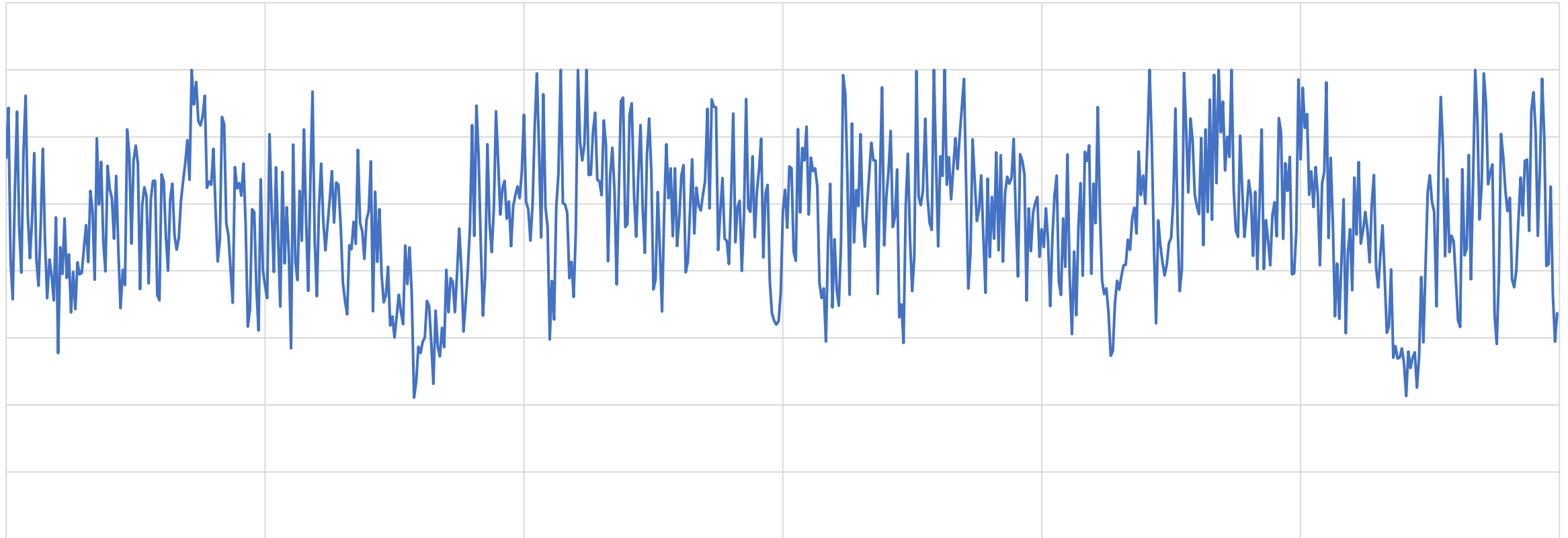
- Cycles plus complexes
- Le stockage sera un bon outil surtout pour la partie des cycles qui sont récurrentes





Étude de cas – procédé en batch
agro-alimentaire

Profil de consommation de vapeur mensuelle

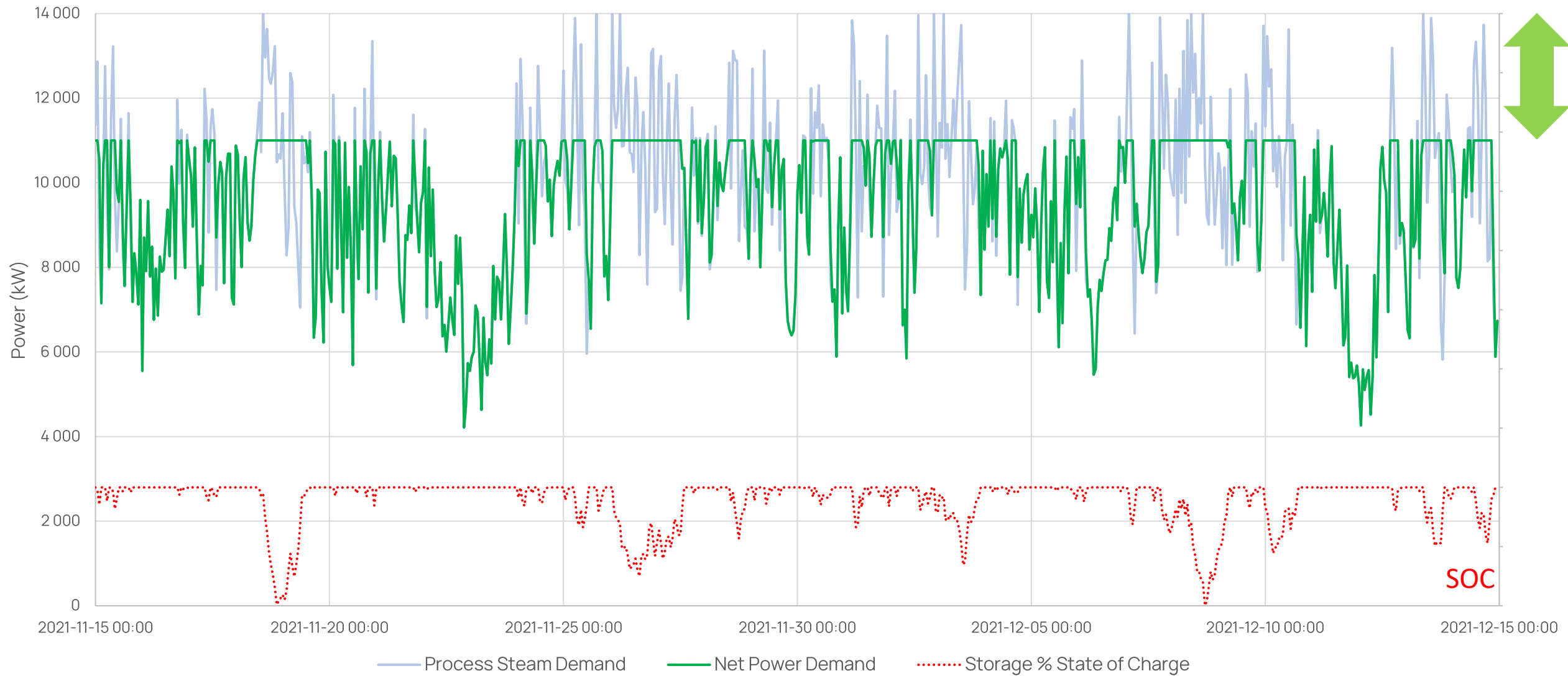


- Procédés thermiques en batch
- Vapeur actuellement fournie par chaudières au gaz
- Consommation électrique de base stable
- Hypothèse que les mesures de récupération & thermopompes sont déjà mises en place

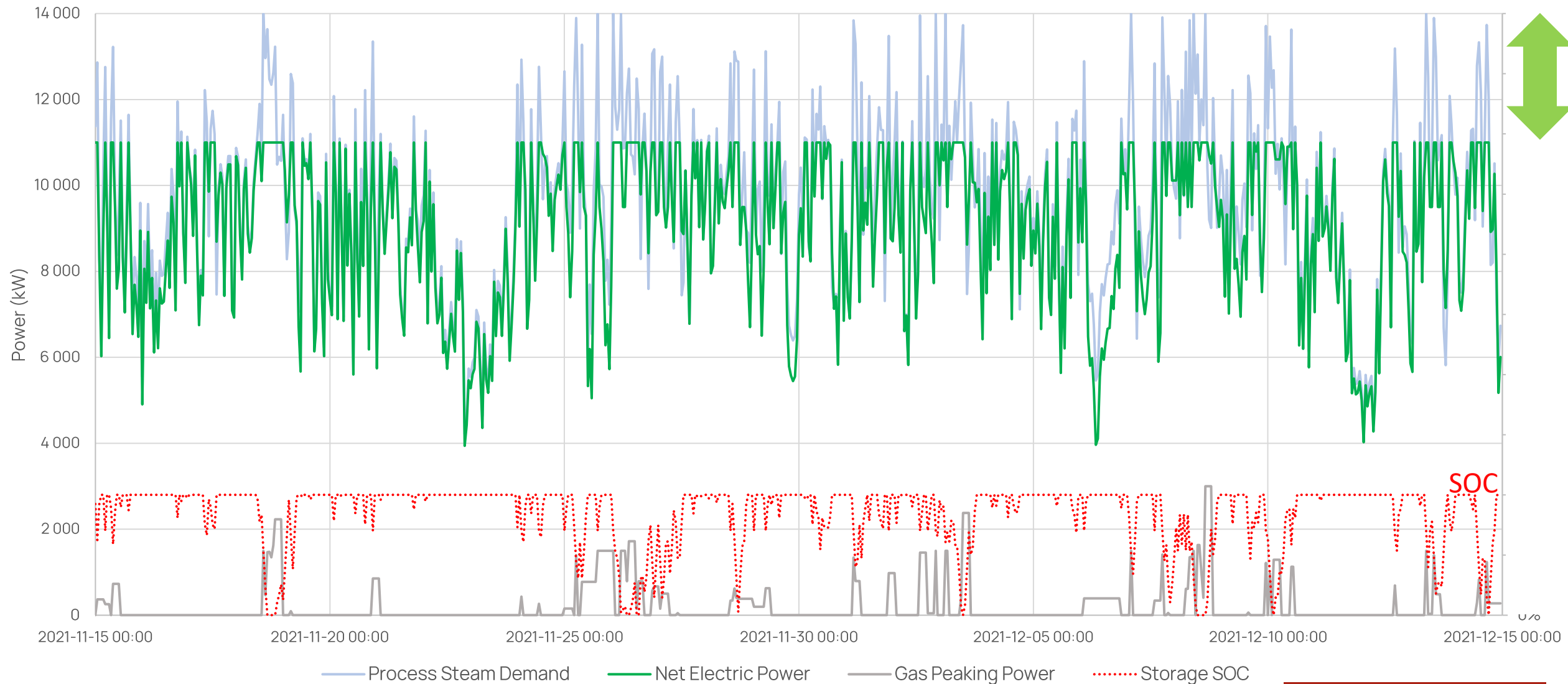
Scénarios de décarbonation avec stockage thermique dans un procédé en batch

- Tout-électrique
 - Capacité de stockage installé vs. réduction de la pointe
- Hybride (GNR d'appoint)
 - Pour différentes configurations de stockage, optimiser l'utilisation du carburant d'appoint
 - Capacité de stockage installé vs. réduction de la pointe

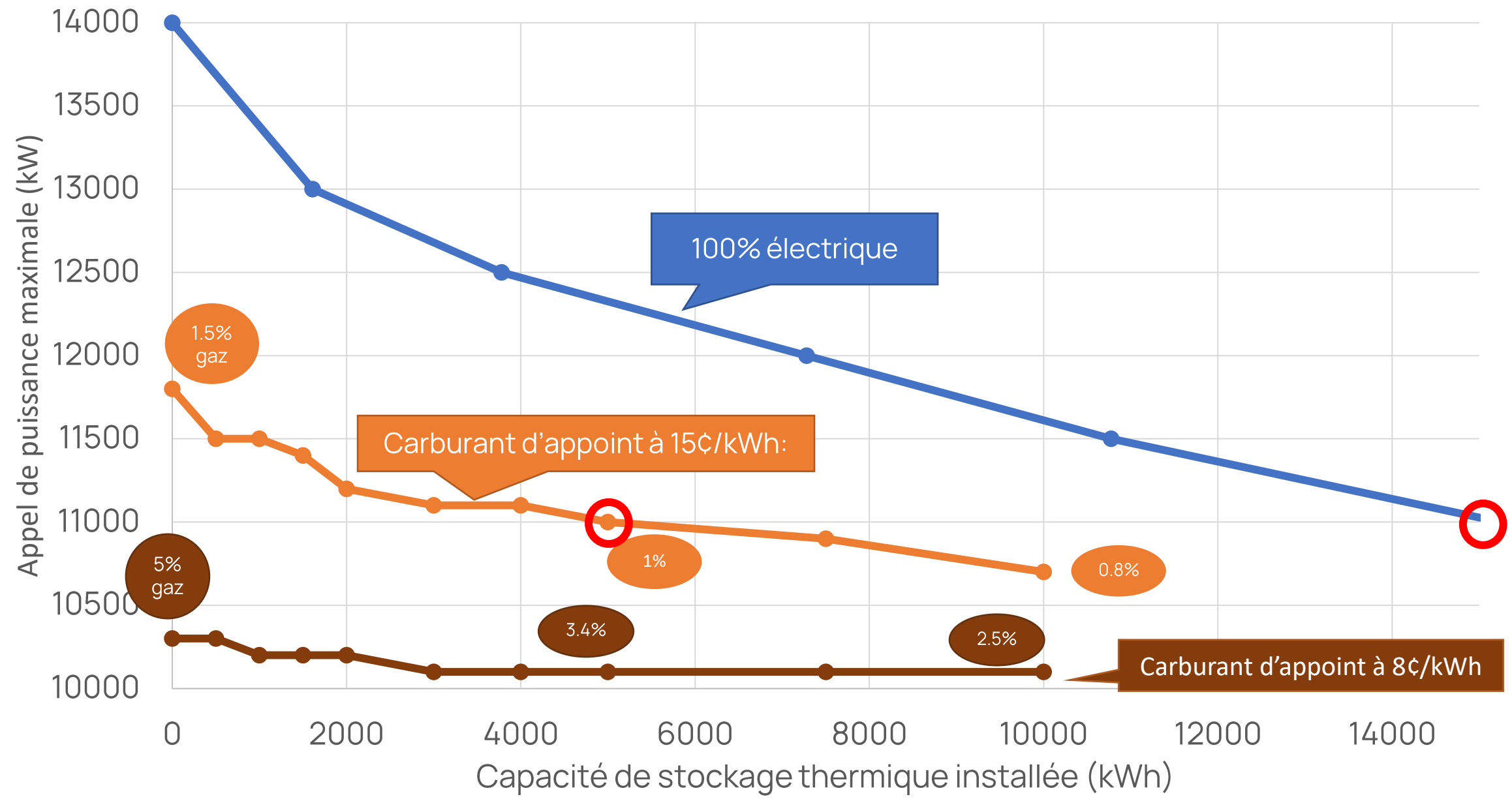
100 % électrique, 15 mWh de stockage



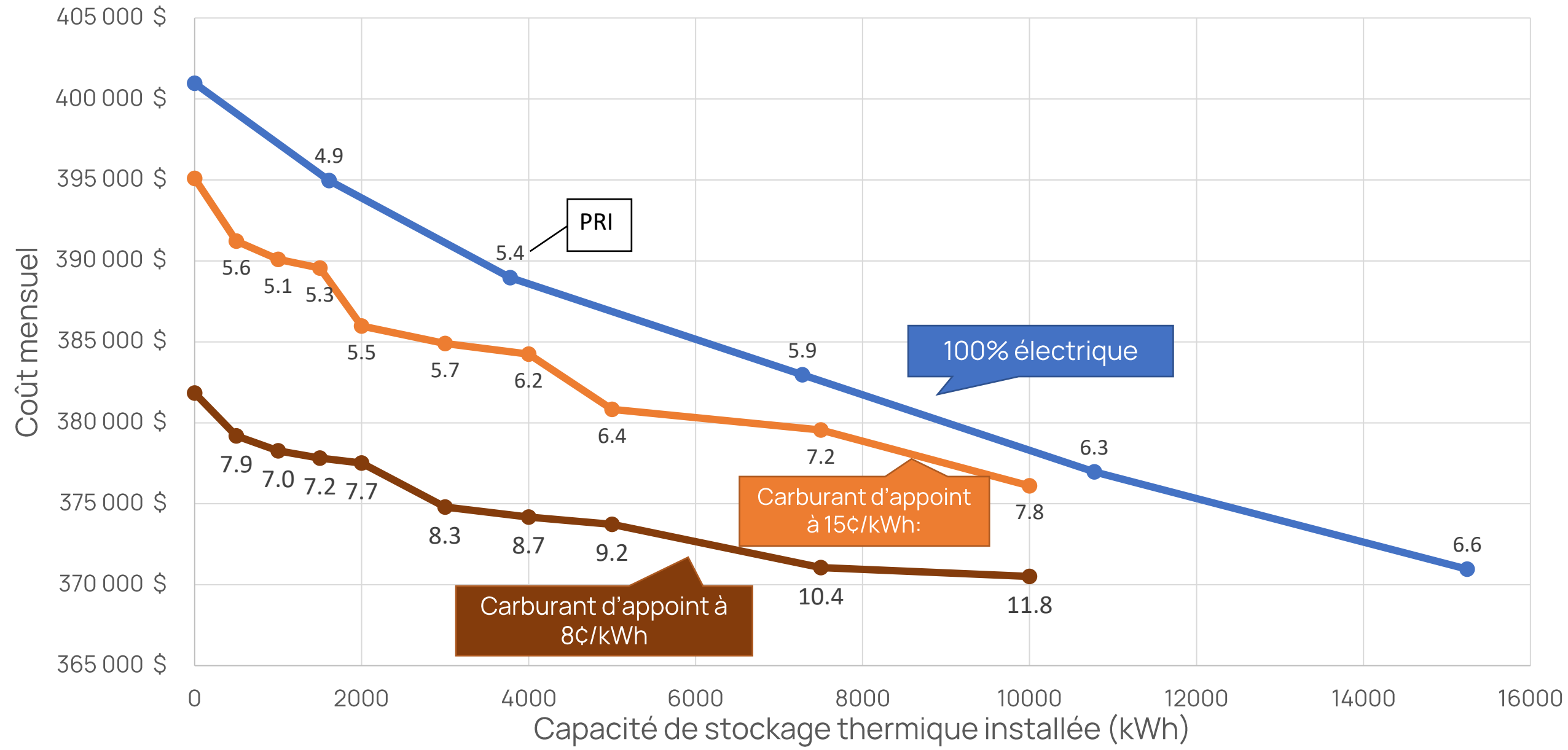
Avec appoint limité au gaz, 5MWh de stockage



Plant Peak Power Reduction via Thermal Storage, With & Without Fuel Back-Up



Retour sur investissement en stockage thermique



Conclusion

Conclusion

- Le stockage thermique à haute température sera l'un des outils importants pour faciliter le **couplage sectoriel** électricité-chauffage
- Le stockage est un bon outil pour des cycles **~journaliers**, causés par:
 - Génération variable (solaire, éolienne)
 - Demande variable (procédé en batch)
- En industriel, les combustibles d'appoint joueront un rôle complémentaire pour les pointes plus élevés/moins fréquentes
- **Au Québec**, le stockage sera un outil clé pour décarboner les procédés à *demande variable*

Liens utiles

Fabricants de stockage thermique avec activités en Amérique

- [Rondo Energy](#)
- [Brenmiller Energy](#)
- [Electrified Thermal Solutions](#)
- [Antora Energy](#)

Fabricants de stockage thermique actifs en Europe seulement

- [EnergyNest](#)
- [Kyoto Group](#)
- [Kraftblock](#)
- [Polar Night Energy](#)

Groupes de recherche & promotion

- [Renewable Thermal Collaborative](#)
- [Long Duration Energy Storage Council](#)

Questions?

30
ans



nannejohn@ecosystem.ca
nicholas.annejohn@mail.mcgill.ca
[linkedin.com/in/nickannejohn/](https://www.linkedin.com/in/nickannejohn/)

Prochain webinaire le 18 octobre
présenté par Mme Gabrielle Beaudry

**« Mise à Jour sur les puits à
colonne permanentes »**



Réseau Energie
et Bâtiments