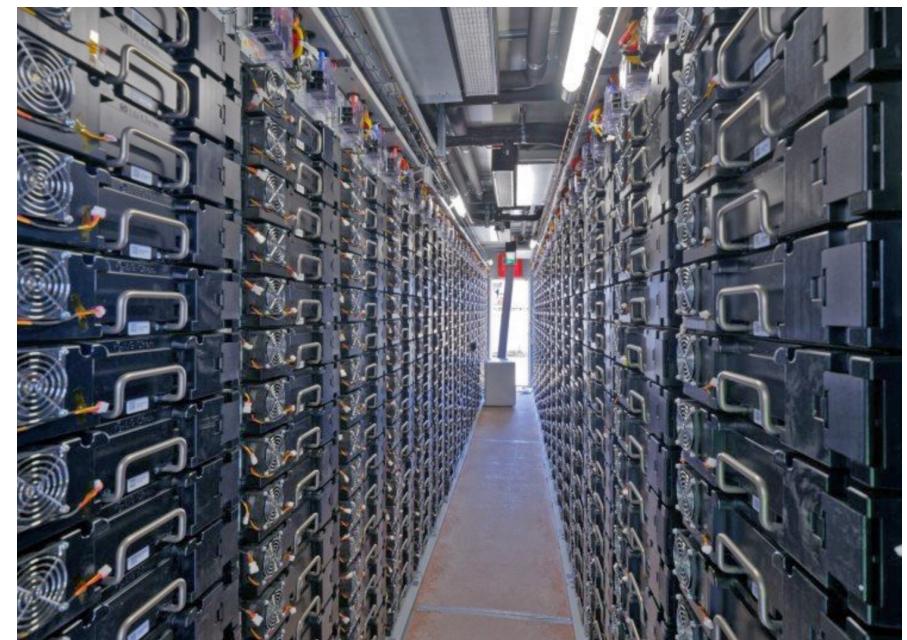




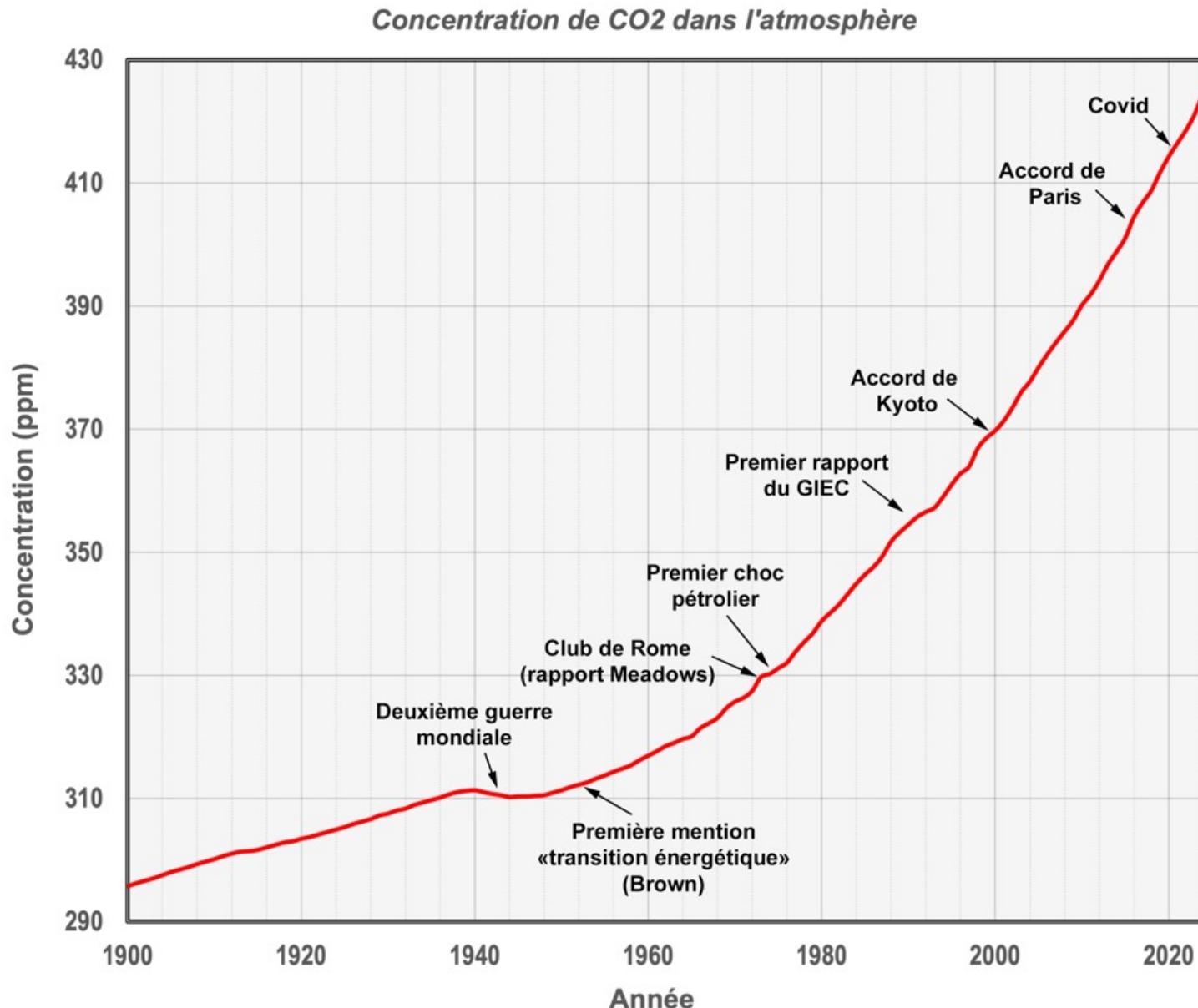
Stockage de l'électricité: une mesure pour atteindre les objectifs climatiques ?

Bertrand Daout
6 février 2026

bertrand.daout@bluewin.ch



■ Contexte environnemental



■ Contexte énergétique

Buts stratégies énergétiques pour 2030 et 2050, notamment :

- Réduire les émissions de GES (accord de Paris, lois suisses, etc.)
- Réduire le déficit hivernal
- Absorber l'augmentation de la consommation
- Diminuer la dépendance de l'étranger.

Quelques stratégies possibles:

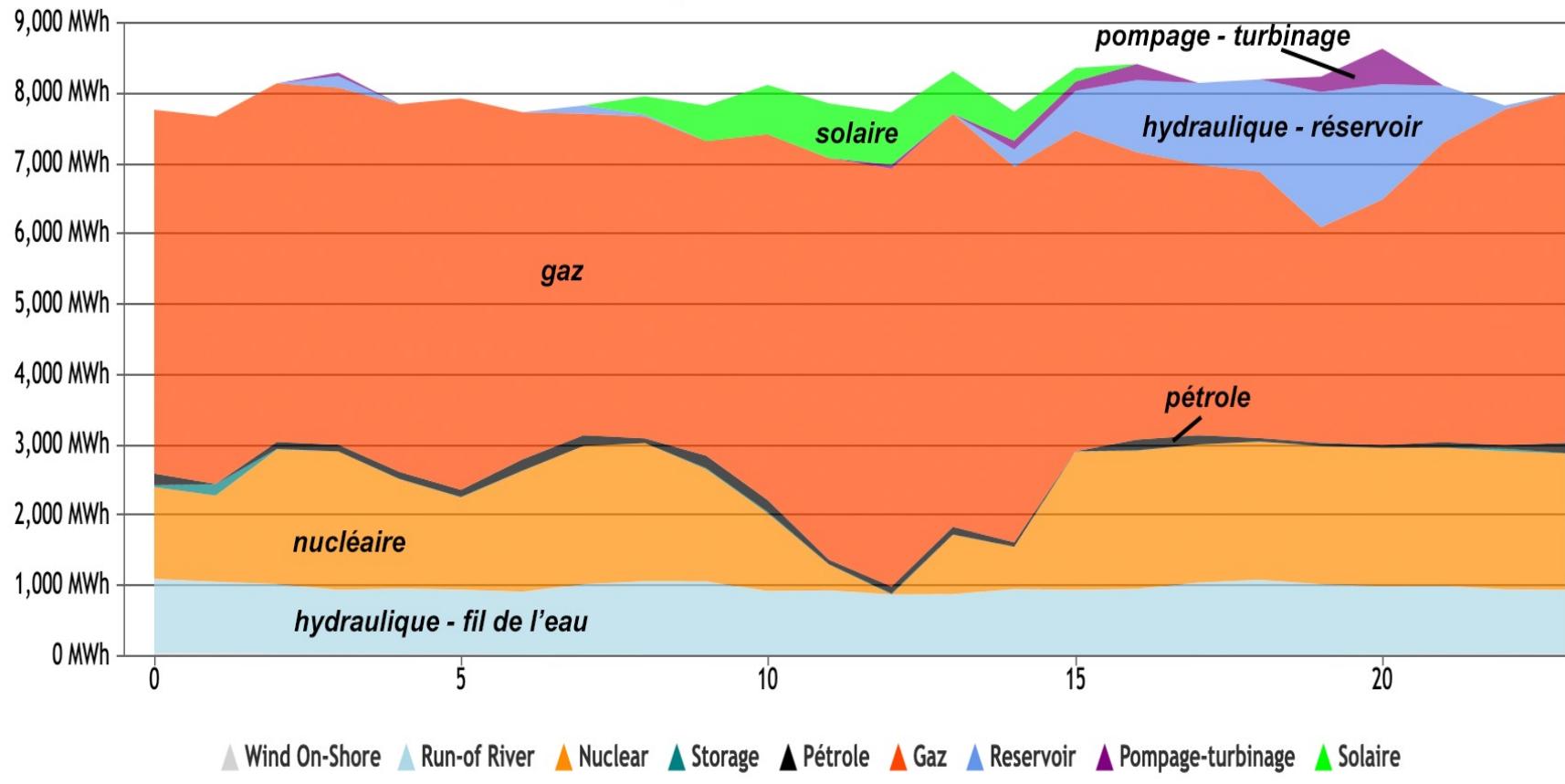
- Tout électrique
- Voie hydrogène
- Carburants ou gaz synthétiques
- Tout nucléaire
- Continuer comme avant (environ 85 % de fossile mondialement)
- Amélioration des comportements. Sobriété. Efficacité énergétique maximale.



Pourquoi stocker ?

■ Stockage saisonnier : pourquoi ?

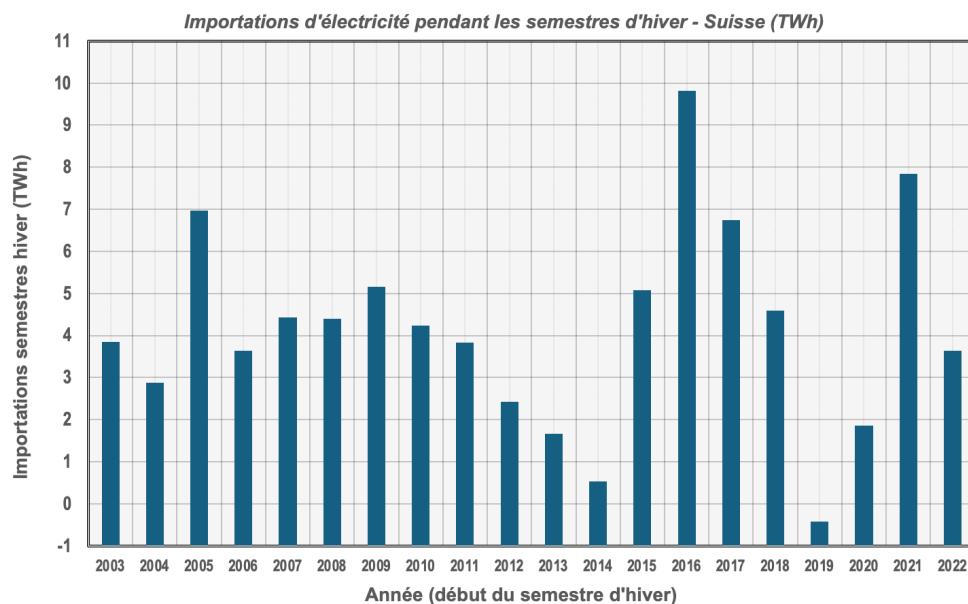
➤ Mix électrique du 11 janvier 2026:



$$I_{ce} = 337 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$$

■ Stockage saisonnier : pourquoi ?

- Pas assez d'électricité produite en Suisse en hiver.
- Le passage à la mobilité électrique et la généralisation des pompes à chaleur améliore les rendements énergétiques mais augmente la consommation d'électricité
- La fermeture des centrales atomiques prévue pour les années 2033 à 2044 (Beznau I et II 2033 et 2034 et les autres vers 2044)
- Réchauffement climatique: la diminution de volume des glaciers va diminuer la quantité d'eau accumulée l'hiver.



➤ **Moyenne 2015-2022:
5 TWh**

■ Déficit hivernal – actuel et prévisions

➤ En Suisse:

<i>Année</i>	<i>déficit hivernal (TWh)</i>	<i>par habitant (MWh)</i>	<i>par ménage (MWh)</i>
2015 - 2022	5	0.56	1.3
2030	8	0.89	2
2040	15	1.7	3.7
2050	20	2.2	4.9

*Selon notamment l'OFEN, Swissgrid, et
Future Swiss Energy Economy: The Challenge of Storing Renewable Energy, Andreas Züttel, 2022*

■ Déficit saisonnier - prévisions

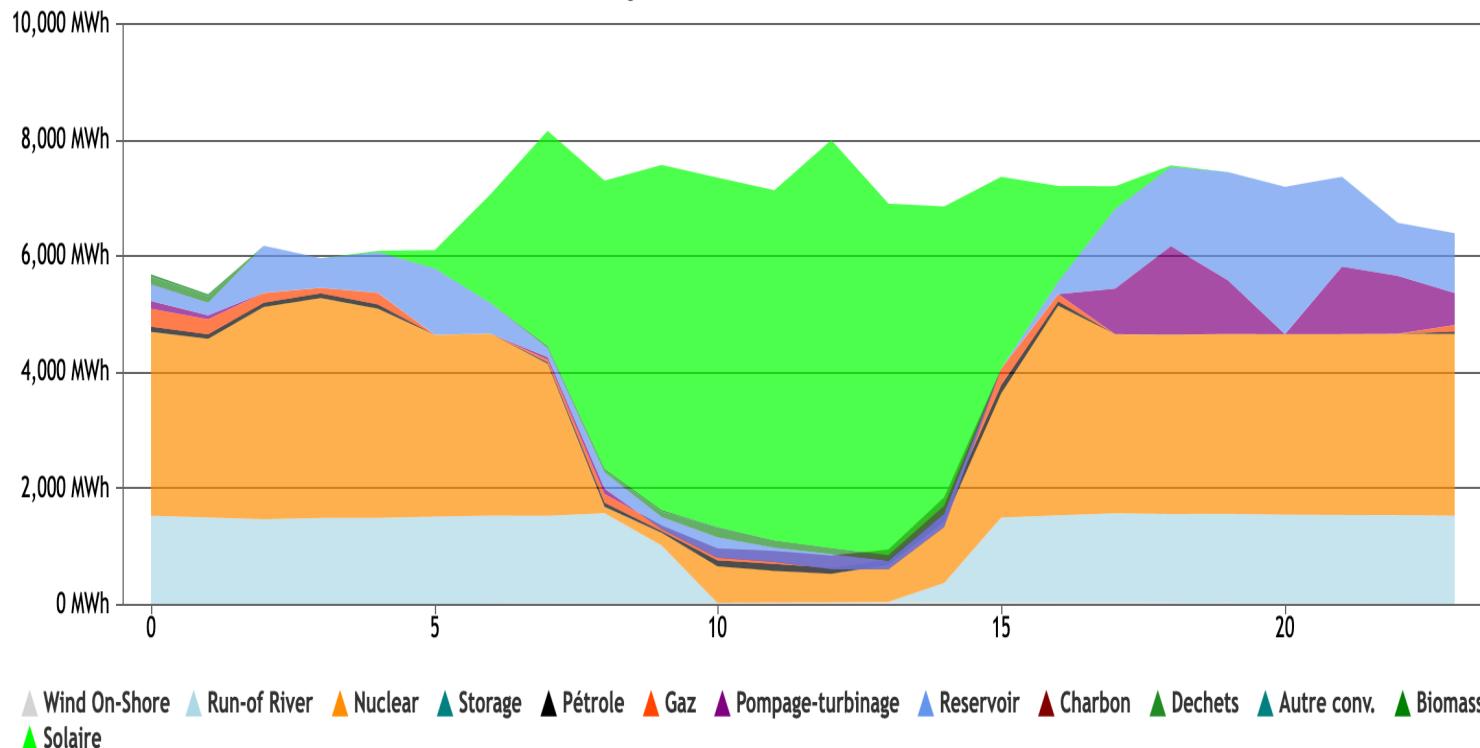
➤ **Estimation 2050 pour le Monde :**



- Population concernée mondialement: $N_m = 3$ milliards
- Energie saisonnière à stocker: $E_s = 2$ MWh/hab
- Energie saisonnière totale à stocker: $E_{stot} = 6'000$ TWh

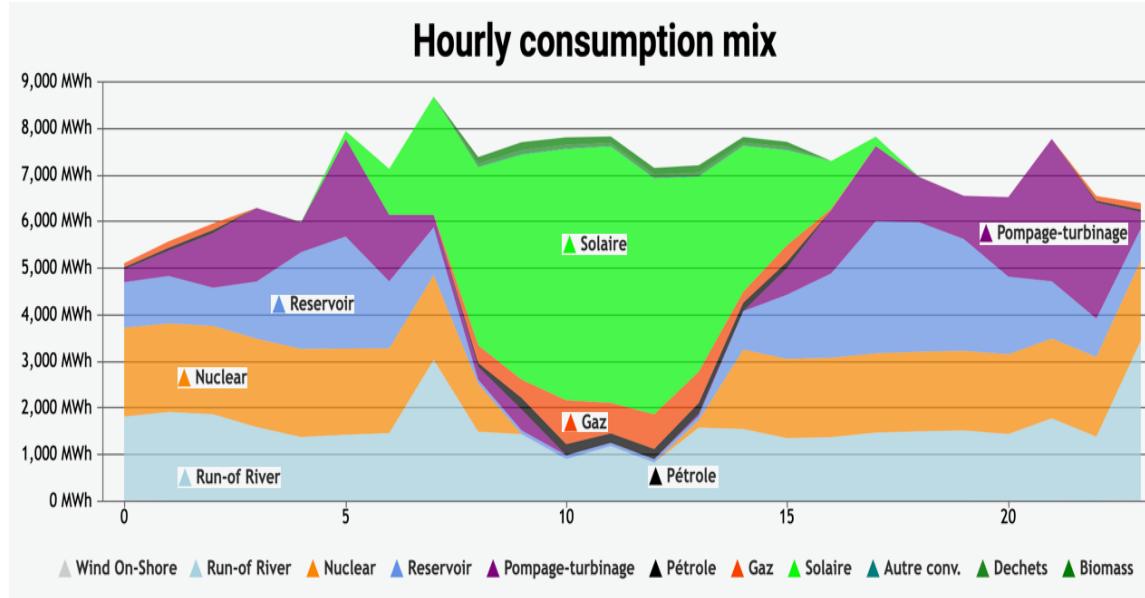
■ Déficit journalier

- L'énergie solaire doit être stockée pour être utilisée la nuit !

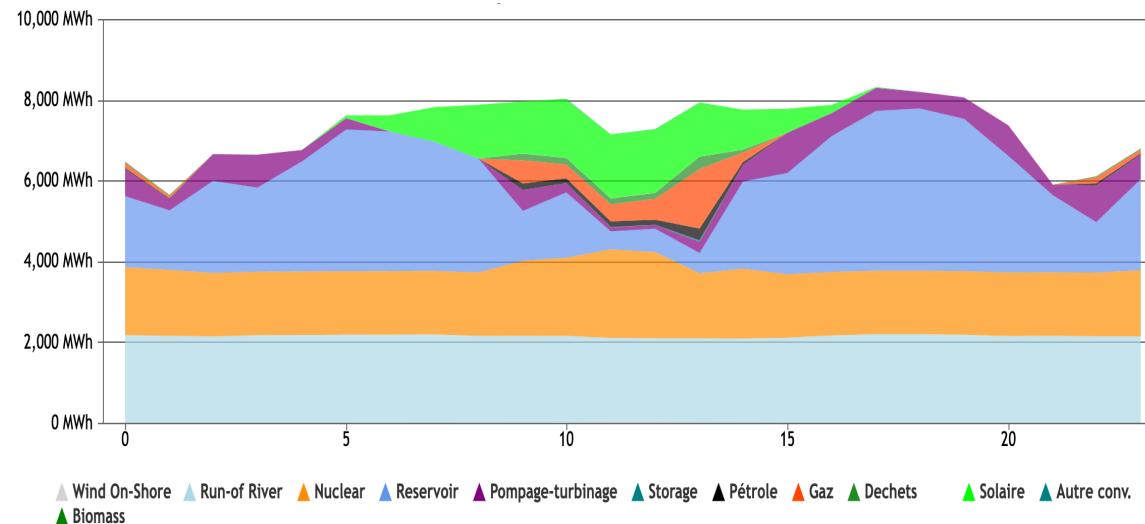


Energie consommée en Suisse - 5 aout 2025 (été)

Déficit journalier



Energie consommée
28 mars 2025 (printemps)



Energie consommée
23 septembre 2025 (automne)

■ Déficit journalier

Nécessité de stockage journalier **actuelle** : **65 GWh**

Prévision pour **2050**. On considère:

- Electrification complète de l'économie (mobilité, chauffage, etc)
- Electrification entraîne des processus plus efficaces (30 %)
- Augmentation de la consommation électrique de +58 % en 2050.

Résultats du calcul estimatif pour le stockage journalier:

- 2030: **71 GWh**
- 2050: **230 GWh**

(= environ **1 %** du stockage saisonnier nécessaire)

■ Déficit journalier

En résumé (estimations) :

<i>Année</i>	<i>déficit journalier (GWh)</i>	<i>par habitant (kWh)</i>	<i>par ménage (kWh)</i>
2024	65	7.2	16
2030	71	7.9	17
2050	230	26	56

■ Déficit journalier - Monde

➤ **Estimation 2050 pour le Monde :**

- Population concernée mondialement: **$N_m = 3$ milliards**
- Energie journalière totale à stocker: **$E_{stot} = 60$ TWh.**
- Energie journalière à stocker: **$E_s = 20$ kWh/hab**



Quoi stocker ?

■ Source: énergie solaire

- C'est l'énergie solaire qu'il faudra stocker (à défaut d'éolien en Suisse)
- Actuellement installé en Suisse: 35 km² qui ont fourni **6.35 TWh** d'électricité en 2024
- Scénario intermédiaire Swissolar:
2030 : 16 TWh
2035 : 24 TWh

Type	Potentiel théorique (TWh/an)	Surface équivalente (km ²)	Potentiel à court et moyen terme (TWh/an)	Surface équivalente (km ²)
Toits	49.1	263	23.3	124.6
Façades	17.2	131.3	8.2	62.6
Infrastructures (routes + parkings + talus d'autoroute)	35.2	188.3	10.3	55.1
Alpin	16.4	64.1	3.3	12.9
Total	11	667	45	255

Photovoltaik-Potenziale der Schweiz, Prof. Dr. Christof Bucher, Berner Fachhochschule, August 2022

https://www.swissolar.ch/02_markt-politik/solarmonitor-schweiz/solarmonitor_schweiz_2024_fr.pdf

https://www.swissolar.ch/01_wissen/swissolar-publikationen/branchen-faktenblatt_pv_ch_d.pdf?



Techniques de stockage

■ Catégorie de stockage

- Journalier (jour / nuit) et éventuellement sur quelques jours
- Saisonnier (été / hiver)
- Mécanique: par gravité (pompage-turbinage, masses suspendues), air comprimé, volant d'inertie
- Électrochimique (batteries)
- Thermique: chaleur sensible, changement de phase
- Champ magnétique (stockage dans le champ magnétique d'une bobine)
- Champ électrique (dans un condensateur ou un super-condensateur)
- Chimique: power-to-gas, power-to-liquid, power-to-metal, osmose, etc.

■ Catégorie de stockage

➤ **Local**

Avantage: cela soulage le réseau et en diminue ses capacités.

➤ **Régional**

Meilleure économie d'échelle, mais soulage seulement partiellement le réseau.

➤ **Centralisé**

La meilleure économie d'échelle possible.

Plus facile de trouver des lieux d'installation?

Nécessite un réseau dimensionné pour des périodes de pointes importantes.

■ Stockage hydraulique

- 99 % de l'énergie électrique mondiale stockée sous forme hydraulique
- Réservoir et pompage-turbinage
- Utilise un matériau "gratuit"
- Faible densité d'énergie 0.272 kWh/m³ (pour 100 m)
- Durée de vie très longue, > 100 ans
- Cout d'infrastructure relativement bas
- Exemple: Grande-Dixence: $E_{tot} = 1.7 \text{ TWh}$ (énergie accumulée).



Grande-Dixence

Chiffres fin 2024:

Production électrique suisse: 62.8 TWh

Production hydraulique totale: 37.4 TWh (59.5 %)

Centrales au fil de l'eau: 18.1 TWh

Centrales à accumulation: 17.8 TWh

Production pompage-turbinage: 1.53 TWh
(4.1 % de l'hydraulique)

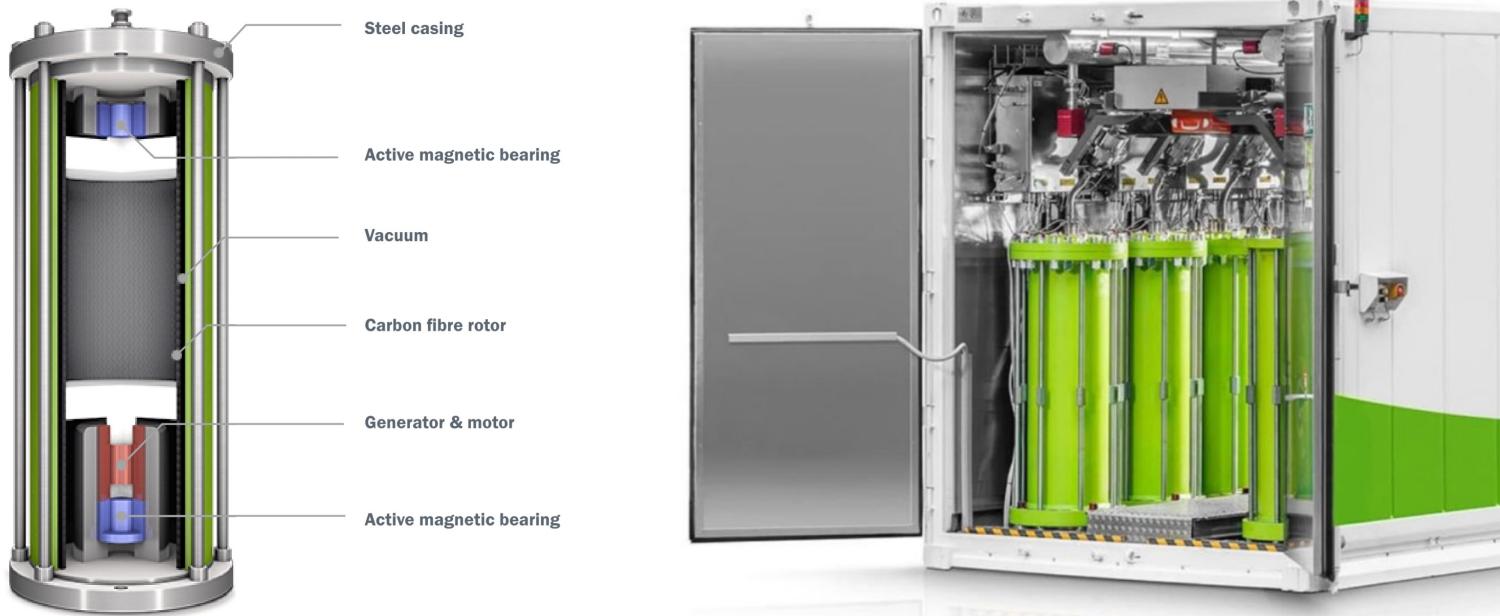
■ Gravité



Installation prototype EnergyVault (Tessin)

- $H = 120 \text{ m}$
- Capacité de stockage: 35 MWh (570 fois moins que Nant-de-Drance)
- Poids des blocs de béton: 107'000 tonnes
- Efficacité de cycle: 75 – 80 %
- Faible densité énergétique de stockage: 0.65 kWh/m^3 (pour 100 m)

■ Energie inertielle



Volant d'inertie / Stornetic

- Principe simple mais application complexe (vide, forte vitesse de rotation, etc.)
- Durée de vie élevée (> 20 ans)
- Rendement élevé (env. 90 %)
- Faible densité d'énergie : 0.002 kWh/kg
- Nécessite une masse de matière qui est coûteuse, lourde et encombrante
- Haute vitesse de rotation donc pas approprié pour du stockage de durée (seulement minutes)

■ Stockage par air comprimé (CAES)

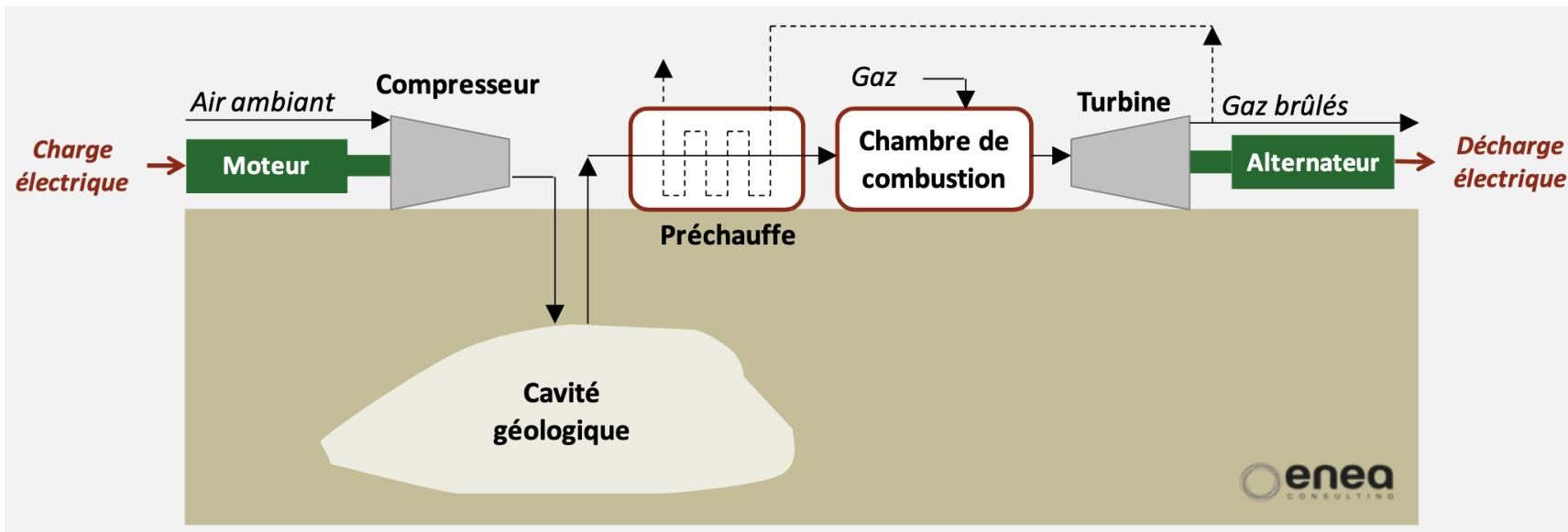


Schéma d'une installation CAES (enea)

- Peut être mis en œuvre à proximité de consommation et d'utilisation des turbines à gaz à cogénération chaleur / électricité
- Nécessite du gaz pour son fonctionnement
- Rendement atténué par la nécessité de réchauffer l'air comprimé détenu et que le compresseur produit beaucoup de chaleur.
- Il est nécessaire de disposer d'un très grand volume de cavité géologique très étanche qui demande de la surveillance.

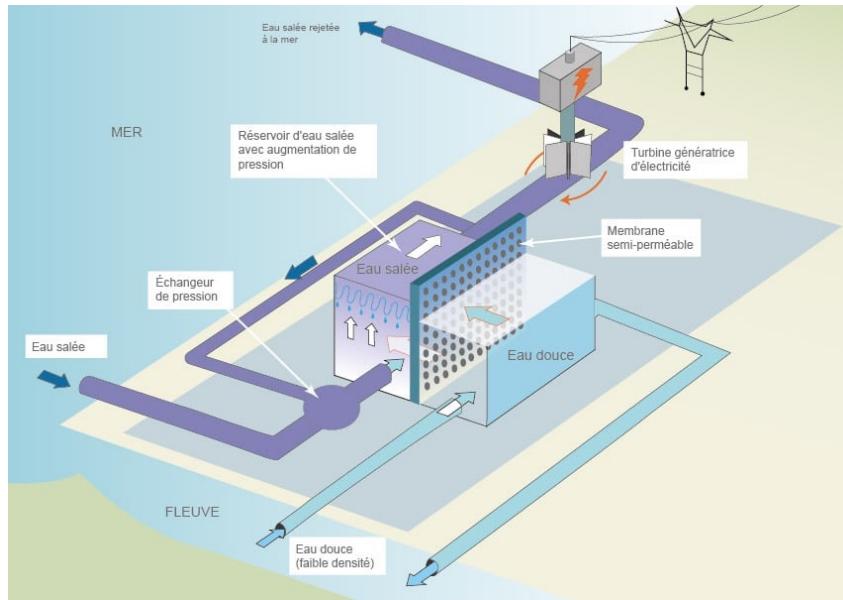
■ Stockage par CO₂ comprimé



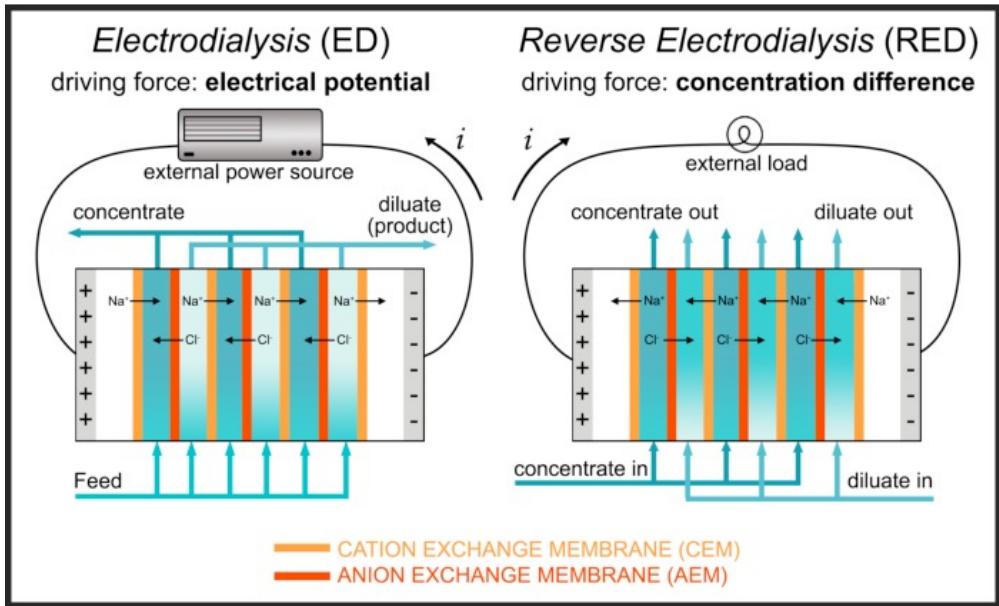
Installation Energy Dome, Ottana (Italie 2025)

- Variante du gaz comprimé mais utilise avantageusement du CO₂
- Serait moins cher que stockage Li (-30 à 40 %)
- Grande durée de vie et matériaux simples
- Faible densité énergétique /prend énormément de place
- Fuite de CO₂ possible
- Nécessite du CO₂ de qualité.

■ Stockage par osmose



Usine production électrique par osmose



Principe d'osmose réversible

Dispositif réversible, capable de :

- extraire de l'énergie en laissant les ions traverser passivement les membranes selon le gradient,
- stocker de l'énergie: on restaure ce gradient en forçant les ions à migrer contre le gradient grâce à un courant électrique.

Ce n'est possible que si l'on dispose :

- de deux réservoirs (faible salinité et forte salinité),
- de membranes échangeuses d'ions suffisamment sélectives,
- d'un système permettant d'électrolyser / re-séparer les ions à l'aide d'un courant électrique.

■ Stockage par batterie Li-ion

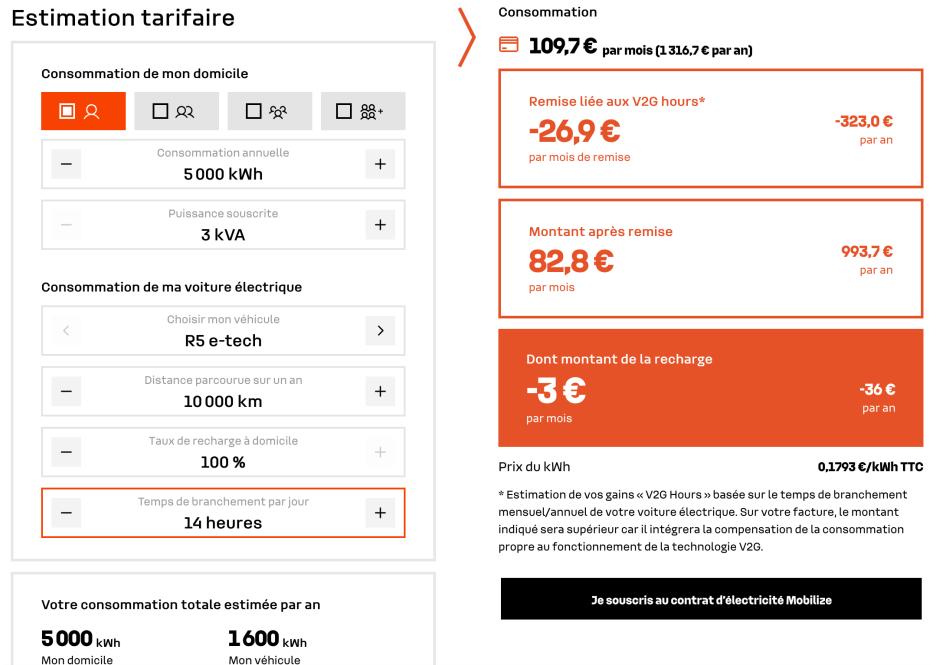
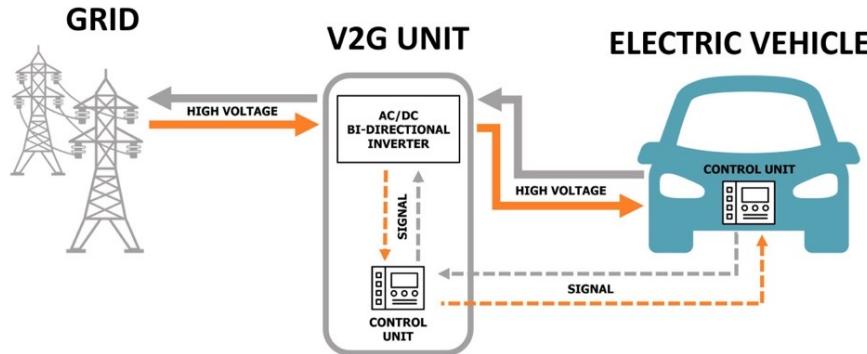


Installation Blackhillock (Ecosse) 200 MW / 400 MWh

- Cout actuel : $\approx 1'000$ CHF/kWh (inst. domestiques), tout compris, avec transport, installation et onduleur.
280 CHF/kWh¹ (très grosses installations)
- Couts environnementaux problématiques.
- Pénurie de plusieurs matériaux déjà pour 2035
- Difficile à recycler correctement
- Danger d'incendie / besoin de système de contrôle et de sécurité.
- Bon rendement aller-retour (env. 90 %).

- ¹ : Couts tout compris. Valeur la plus basse de 5 grosses installations dont les chiffres sont publiés.
- Voir aussi: les batteries sur le réseau électrique, Bernard Dugas, Ecube, 3.5.2024

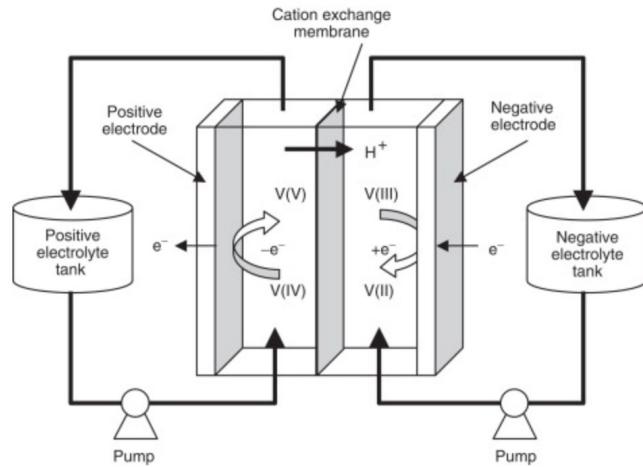
■ Stockage par batterie / V2G



Exemple de contrat en France (Mobilize)

- Système existant qui évite de nouvelles infrastructures. Utilise donc peu de ressources supplémentaires.
- Demande des adaptations de comportement et d'infrastructures pour permettre partout une connexion au réseau. Compatibilité entre les systèmes espérée vers 2027.
- Durée de vie réduite par les cycles supplémentaires.

■ Stockage batterie redox-flow



Principe redox-flow – exemple Kemiwatt



Installation USA de Sumitomo (2 MW / 8 MWh)

- Longue durée de vie et cycles nombreux.
- Sécurité et non-inflammabilité.
- Matériaux biodégradables (dans le cas Kemiwatt)
- Densité énergétique faible : 15 à 20 fois moins que les batteries Li-ion.
- Puissance / intensité limitée (C-rate faible)
- Complexité mécanique et maintenance : nécessité de pompes, de circulation d'électrolyte, de membranes, etc.
- Coût spécifique et dimensions: pas adapté à des petites installations ou des usages mobiles.

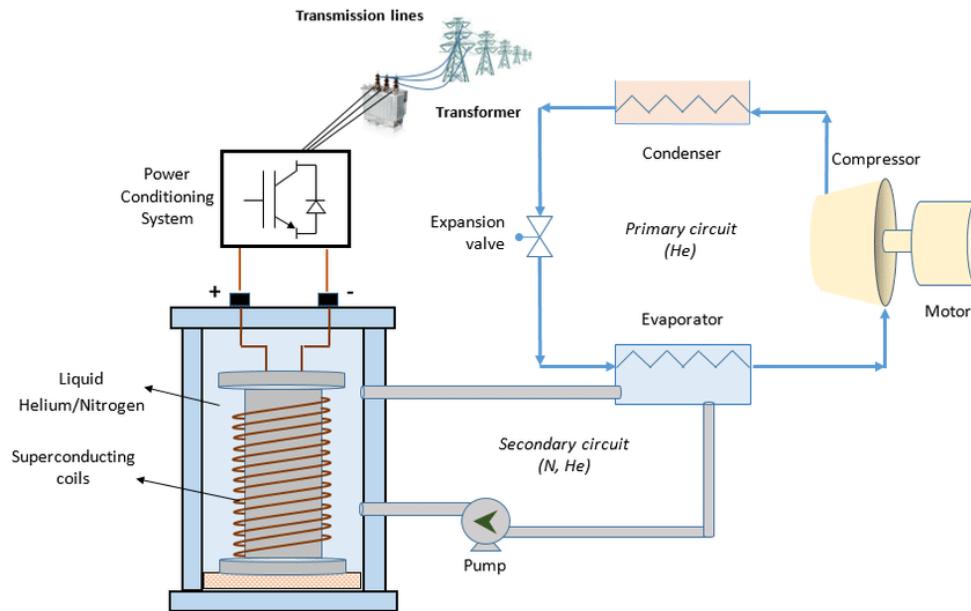
■ Supercondensateurs



Supercondensateurs – Maxwell et Skeleton

- Puissance massique élevée (10 kW/kg)
- Faible densité d'énergie (5 – 10 Wh/kg), env. 30 fois moins que pour les batteries au lithium. Temps de réaction très court et courant de décharge très élevé (mais moins que la plupart des condensateurs)
- Très grand nombre de cycles (millions)
- Beaucoup trop faible pour du stockage à moyen et long terme.

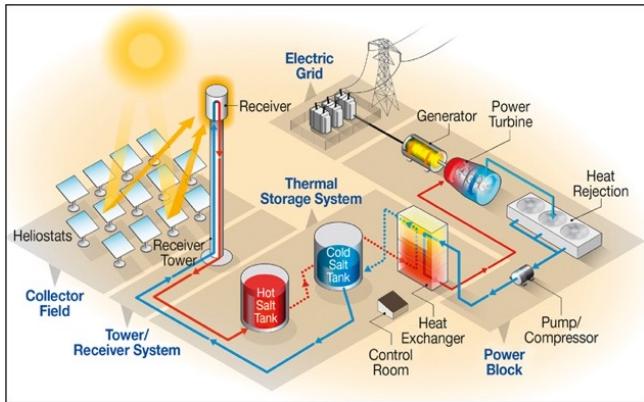
■ Inductance supraconductrice



Principe de fonctionnement – accumulation sous forme de champ magnétique

- Bon rendement (85%) mais grevé par le dispositif de cryogénie
- Temps de réaction très court
- Grande durée de vie
- Coûts d'investissements extrêmement élevés.

■ Stockage thermique



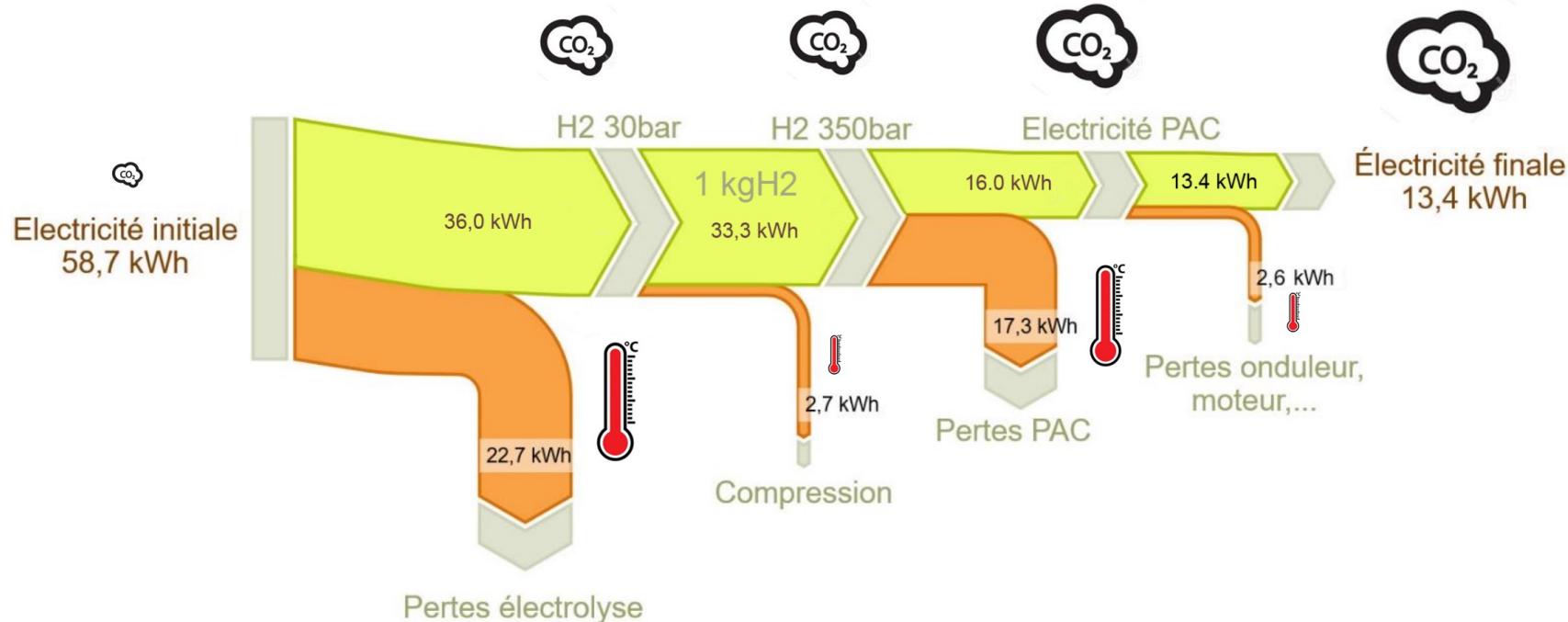
Centrale thermique solaire et stockage sous forme de sels fondus

- En général, pas de production électrique mais restitution de chaleur
- Utilise des matériaux abondants et peu chers (briques, sel)
- Installations d'un coût relativement modéré
- Stockage sur une temps moyen (1 jour). Pas pour le stockage saisonnier
- Limité à certaines régions où il n'y a souvent pas besoin de beaucoup d'énergie
- Pour les centrales solaires: rendement moyen (60 %) et nécessite beaucoup de place.



Stockage dans des briques réfractaires

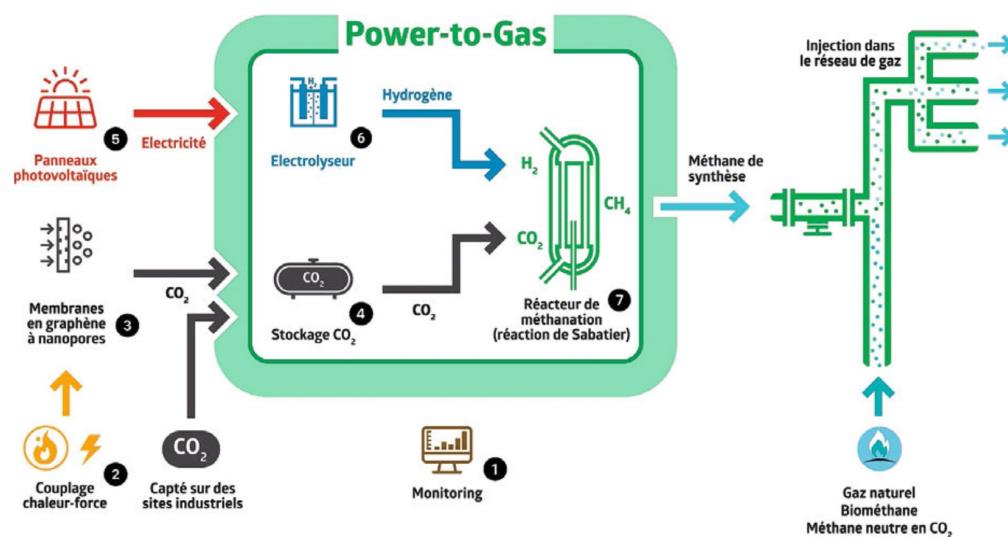
■ Hydrogène



En résumé, les rendements sont les suivants:

- Électrolyseur: 61.3 %
- Compression 350 bars: 92.5 %
- Pile à combustible: 48 %
- Moteur électrique et transmission: 83.7 %
- Rendement total: 22.8 %

■ Gaz synthétique (power to gas)

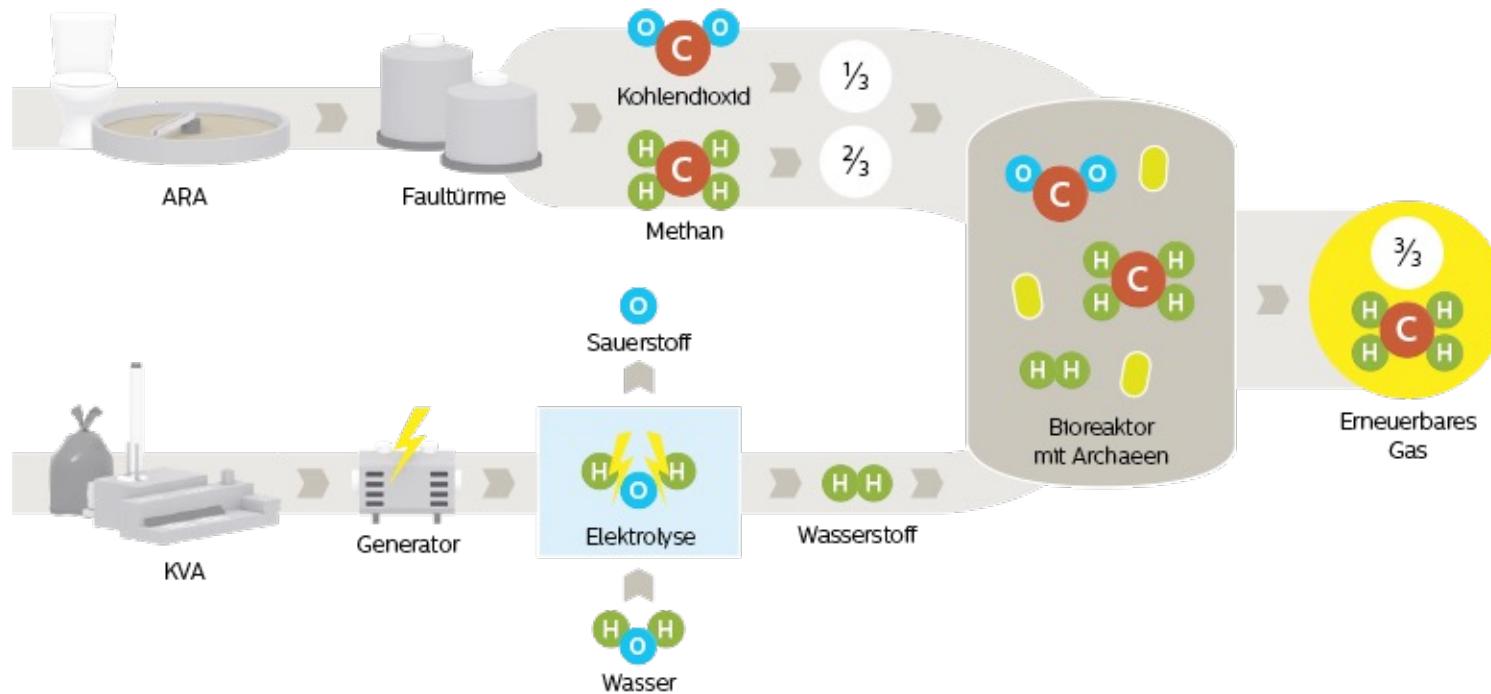


Projet GreenGas et de son Innovation Lab

Le procédé combine plusieurs étapes :

- un électrolyseur transforme l'électricité renouvelable en hydrogène (H₂),
- du CO₂ — capté à la sortie d'installations de cogénération chaleur-force sur le site — est séparé via des membranes en graphène à nanopores,
- l'H₂ et le CO₂ sont injectés dans un réacteur de méthanation à lit fixe de nouvelle génération, produisant du méthane de synthèse (CH₄).

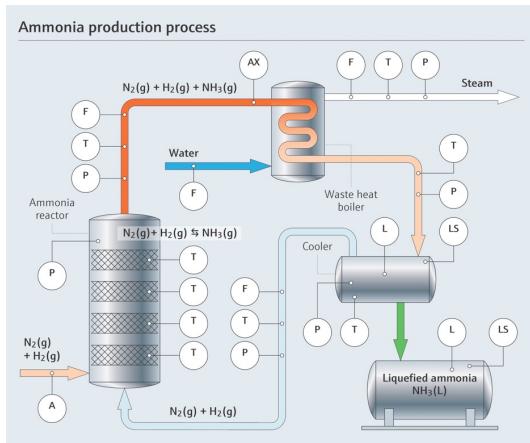
■ Gaz synthétique (power to gas)



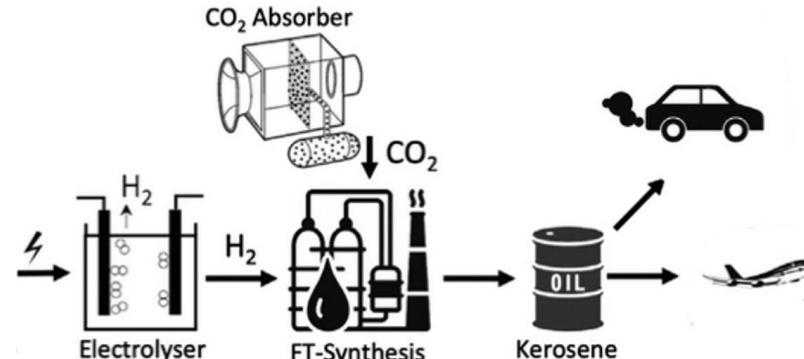
Projet Limeco (Dietikon)

- Récupération du méthane et du CO₂ de la station d'épuration des eaux
- Création d'hydrogène à partir de l'électrolyse en utilisant de l'électricité provenant de l'UIOM
- Production de méthane dans un bioréacteur (bactéries archées).

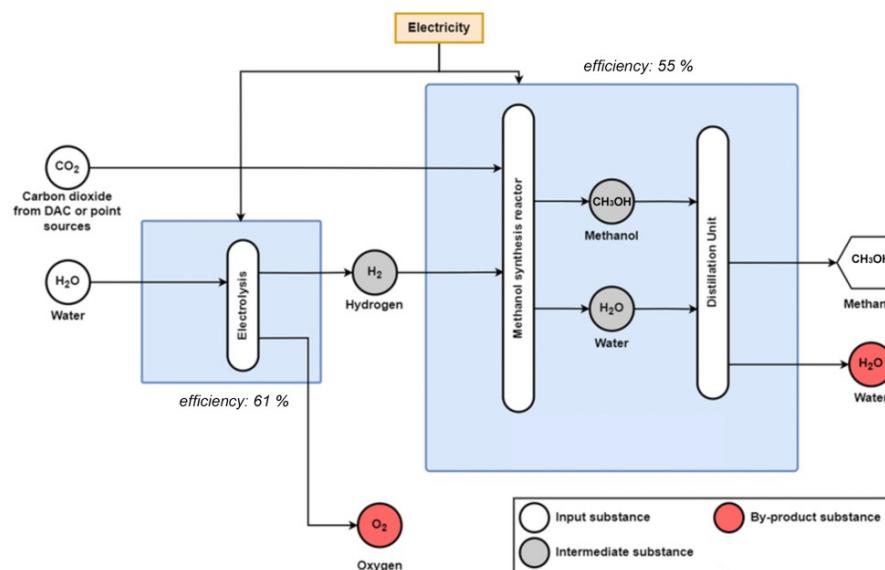
■ Carburant synthétique (power to liquid)



Ammoniac



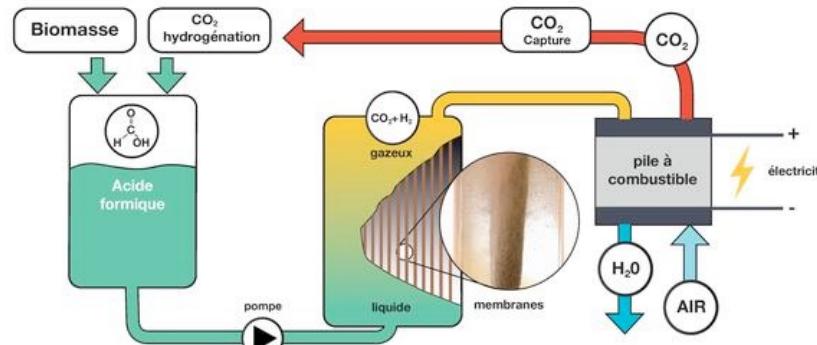
Kérosène synthétique (principe Fisher-Tropsch)



Méthanol

Utiliser l'acide formique comme réserve d'hydrogène

Les énergies renouvelables peuvent facilement être utilisées pour extraire de l'hydrogène. Sa conversion en acide formique en fait un combustible facile à stocker et à transporter.



L'acide formique est produit à partir de biomasse ou grâce à l'hydrogénation du CO₂. Il peut être stocké à température ambiante dans un réservoir.

La technologie développée par l'EPFL et GRT transforme l'acide formique en hydrogène gazeux par catalyse.

Cet hydrogène traverse ensuite la pile à combustible pour produire de l'électricité. Le CO₂ qui traverse le dispositif peut à nouveau servir à la production d'acide formique.

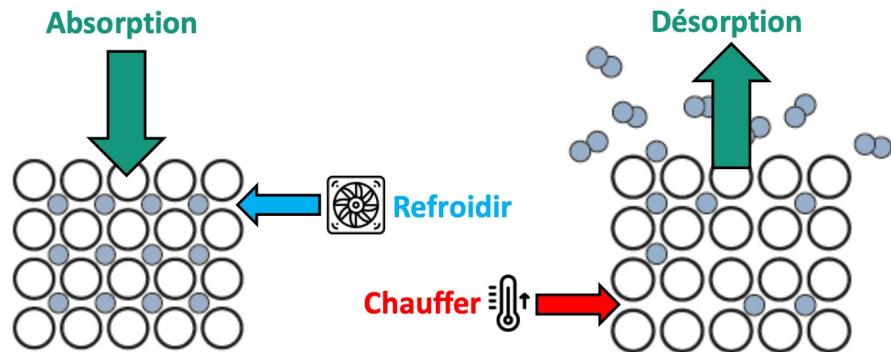
EPFL Infographie: Laura Cipriano

Acide formique

■ Power to metal

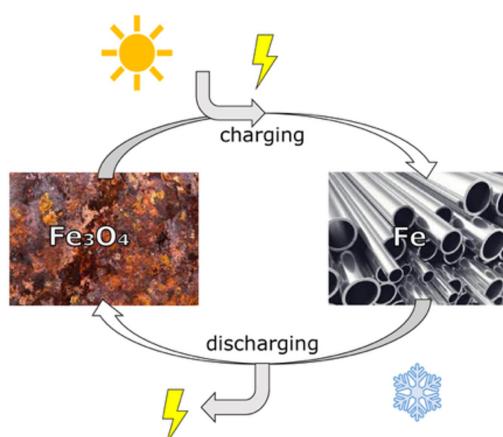
Stockage hydrogène sous forme d'hydrures métalliques

<https://www.grz-technologies.com/>



Réduction chimique oxyde métallique → métal pur

<https://fml.ethz.ch/research/ses.html>



Résumé

Technologie	Capacité disponible	Gamme de puissance	Durée stockage	Efficacité	Durée de vie	CAPEX* énergie (CHF/kWh)	Commentaire
STEP (pompage-turbinage)	1- 100 GWh	100 MW - 1 GW	J / (S)	70-85 %	> 50 ans	70 - 150	Le plus courant et le moins cher au kWh produit. Nécessite énormément d'espace.
Gravité	10-100 MWh	1-10 MW	H / J	75 %	40 ans ?	?	Faible densité énergétique de l'installation.
Volants d'inertie	5 - 10 kWh	1-20 MW	H	> 90 %	100'000 cycles	2'000 – 8'000	Très faible densité énergétique de l'installation.
CAES (compression de gaz)	10 MWh - 10 <u>GWh</u>	10 - 300 MW	J / S	50 %	> 30 ans	50 - 150	Installation très complexe. Nécessite un apport de gaz
Hydrogène et pile à combustible	10 kWh - 10 <u>GWh</u>	1 kW - 10 MW	J / S	25-35 %	5-10 ans	<500	Installation complexe. Efficacité faible. Faible durée de vie
Batteries sodium-soufre	< 100 MWh	< 10 MW	J / S	75-85 %	2000 – 5'000 cycles	150 - 500	Faible densité mais utilise des matériaux faciles à obtenir.
Batteries lithium-ion	< 10 MWh	< 10 MW	J / (S)	90 %	4'000 - 6'000 cycles	300 - 1'200	Matériaux problématique / pénurie prochaine
Batteries flux redox	< 100 MWh	< 10 MW	J / (S)	65-80 %	2'000 – 12'000 cycles	100 - 400	Installation complexe. Très faible densité énergétique de l'installation.
Véhicule V2G	50 - 80 kWh	≈ 3 kW	H / J	85-95 %	4'000 - 10'000 cycles	?	A développer en parallèle avec les infrastructures de recharge
SMES (inductance supraconductrice)	1 - 10 kWh	10 kW - 5 MW	H	> 90%	20-30 ans	> 10'000	Trop complexe
Super condensateurs	1 - 5 kWh	10 kW - 5 MW	H	90-95 %	500'000 cycles	10'000 – 20'000	Trop faible densité énergétique

Notes:

Valeurs indicatives, variant fortement d'une installation à l'autre.

Durée stockage: H: horaire / J: journalier / S: saisonnier.

L'efficacité est le rendement énergétique (équivalent électrique) sur le cycle complet de stockage.

* : CAPEX: Capital Expenditure/: dépenses d'investissement

■ Résumé – autour de l'hydrogène

Technologie	Densité énergétique	Efficacité hydrogène → produit	Efficacité électricité → produit	CAPEX (CHF/kWh)	Commentaires
Pression atmosphérique	3 kWh/m ³	≈ 100 %	≈ 61 %	?	Stockage dans caverne, par exemple. Probablement irréalisable à cause de l'immense volume et des fuites.
Cylindres 300 bars	0.13 kWh/kg 146 kWh/m ³	92 %	56 %	1'500 – 3'200	Disponible aussi en pression plus élevée (700 – 900 bars). Nécessite beaucoup de matière. Densité énergétique moyenne. Fuites possibles.
Gaz synthétique (méthane)	13.9 kWh/kg	?		?(élevé)	Installations complexes. Fuites possibles. Fabrication du CO ₂ problématique.
Acide formique	0.66 kWh/kg 800 kWh/m ³	≈ 50 %	≈ 30 %	?	Stade de la recherche. Faible rendement. Fabrication du CO ₂ problématique.
Ammoniac	2.4 kWh/kg 3'500 kWh/m ³	87 %	53 %	?	Ne nécessite pas de CO ₂ . Gaz毒ique. Combustion NH ₃ polluante: génère des NO _x .
Méthanol	5.5 kWh/kg	88 %	54 %	?	Très毒ique et dangereux. Densité énergétique moyenne. Fabrication du CO ₂ problématique.
Carburant synthétique (kérosène)	12 kWh/kg	70 %	43 %	?(élevé)	Infrastructures existantes pour le stockage. Installations de production complexes. Rendement global faible. Fabrication du CO ₂ problématique.
Hydrures métalliques	0.15 kWh/kg 460 kWh/m ³	70 – 85 %	43 – 52 %	5'000 – 9'000	Densité énergétique faible. Demande beaucoup de métaux.
Oxyde aluminium	8.5 kWh/kgAl	30 – 45 %	18 – 27 %	?	Faible rendement. Nécessite beaucoup d'aluminium.

Notes:

- Valeurs indicatives, variant fortement d'une installation à l'autre.
- L'efficacité "hydrogène → produit" correspond au traitement de l'hydrogène ou à la transformation à partir de l'hydrogène (donc sans électrolyse).
- L'efficacité "électricité → produit" considère la transformation totale, à partir de l'électricité, donc avec l'électrolyse (61 % de rendement).
- Pour l'hydrogène et les hydrures métalliques, les densités énergétiques incluent le contenu et les accessoires (par exemple cylindres, pompes, sécurité, etc.). Ce n'est pas le cas pour les autres.
- L'efficacité est le rendement énergétique (équivalent électrique) sur le cycle complet de stockage.

■ Résumé – autour de l'hydrogène

Pour comparaison:

Technologie	Densité énergétique	Efficacité	CAPEX (CHF/kWh)	Commentaire
Batterie Li-ion	0.12 kWh/kg 180 kWh/m ³	90 %	280 - 1200	
Diesel	12.6 kWh/kg 11'800 kWh/m ³	-	0.17	Densité: sans compter le réservoir (mais impact négligeable)

Notes:

- Valeurs indicatives, variant fortement d'une installation à l'autre.
- Les densités énergétiques incluent le contenant et les accessoires (par onduleur, sécurité, etc.).
- L'efficacité est sur le cycle complet de charge / décharge.

► Intensité matérielle
(= empreinte matérielle)

■ Intensité matérielle – exemple : stockage hydrogène

Données de base (installation centralisée):

- Installation de production / stockage hydrogène (GHP, Bulle)
- Électrolyseur: 2 x 1 MW
- Production uniquement lors de surplus solaire (1/4 du temps): 60'000 kgH₂/an
- Stockage avec des hydrures métalliques.



Electrolyseur de 1 MW

Résultats: masse hydrures nécessaire pour stockage saisonnier, pour l'installation ci-dessus, environ :

- 89 conteneurs (20 pieds) de 73 tonnes
- Volume total: $89 \times 38 = 3'382 \text{ m}^3$
- Masse totale: $89 \times 73 = 6'497 \text{ tonnes}$



Unité de stockage – conteneur 20 pieds

■ Intensité matérielle – exemple : stockage hydrogène

Extrapolation pour le stockage saisonnier 2050, rapporté à un habitant suisse:

- Besoin électrique: 2.2 MWh/hab.
- Rendement pile à combustible: 48 %
- Quantité H₂ nécessaire: $2'200/33/0.48 = 139 \text{ kgH}_2$
- Stockage hydrures métalliques: **15 tonnes / 4.8 m³**
- Stockage en cylindre de 300 bar: **13 tonnes / 15 m³**

■ Intensité matérielle – exemple : stockage hydrogène

Surface de PV nécessaire :

- Stratégie 2050: option majoritairement hydrogène, donc en grande partie solaire, en Suisse
- Besoin électricité 2050: 91 TWh/an
- Par habitant: $= 91/9 = 10.1 \text{ MWh/an}$
- **Surface PV requise: $\approx 120 \text{ m}^2/\text{hab.}$**
- Surface actuellement équipée:
 $\approx 3.9 \text{ m}^2/\text{hab.}$



■ Intensité matérielle – exemple : stockage batterie

Données de base (installation centralisée):

- Installation de stockage par batterie Li-ion (France)
- Investissement: 1'250 euros/kWh
- Capacité (valeur finale): 24 MWh
- Durée de vie des batteries: > 10 ans



Installation RTE Ringo à Vingeanne (F) de 24 MWh



Intérieur d'un conteneur

■ Intensité matérielle – exemple : stockage batterie

Extrapolation pour le stockage saisonnier 2050, rapporté à **un habitant suisse**:

- Besoin stockage électrique: 2.2 MWh/hab.
- Quantité de Li par kWh: 95 g
- Densité volumique totale batterie (y compris onduleur): 180 kWh/m³
- Rendement : négligé (90-95 %)
- Poids total batterie: **12.1 tonnes**
- Volume nécessaire: $2'200/180 = \mathbf{12.2 \text{ m}^3}$
- Masse Li requise: $2'200 \times 0.095 = 209 \text{ kg Li}$

■ Intensité matérielle – exemple : stockage batterie

Surface de PV nécessaire :

- Stratégie 2050: majoritairement électrique, donc en grande partie solaire, en Suisse
- Besoin électricité 2050: 91 TWh/an
- Par habitant: $= 91/9 = 10.1 \text{ MWh/an}$
- **Surface PV requise: $\approx 50 \text{ m}^2/\text{hab.}$**
- Surface actuellement équipée:
 $\approx 3.9 \text{ m}^2/\text{hab.}$



■ Intensité matérielle – exemple : stockage batterie

Extrapolation pour toute la Suisse (si électrification complète):

- Besoin stockage saisonnier: 20 TWh au total
- Quantité de Li requise: 1.9 milliards de kg Li

Extrapolation pour le Monde entier:

- Besoin stockage: 6'000 TWh au total
- Quantité de Li requise: 570 milliards de kg Li

Problème:

- **Réserves mondiales prouvées: 28 milliards de kg Li**

■ Intensité matérielle – résumé imagé

→ pour combler le déficit hivernal en 2050 :

20 TWh, c'est:	
12 x	énergie du contenu du barrage de la Grande-Dixence
2 x	énergie du contenu de tous les barrages suisses
33 x	tunnel du Gothard rempli d'hydrogène à 30 bars
48 x	pyramide de Khéops de batteries Li-ion
$\frac{1}{4}$	tunnel du Gothard rempli de kérosène synthétique



■ Intensité matérielle – emprise au sol



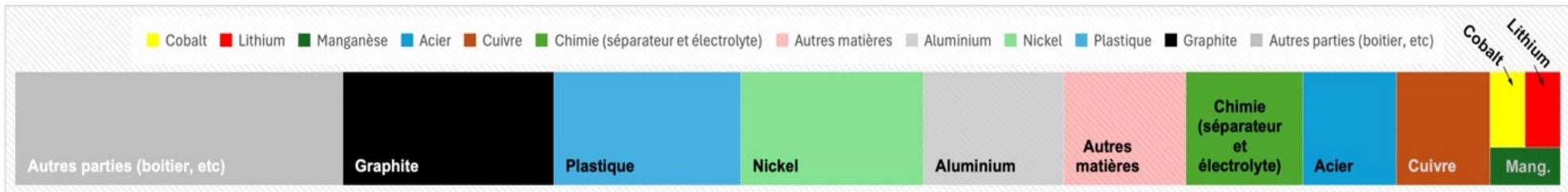
20 TWh de stockage par batterie, c'est:

2/3 surface du canton de Vaud

→ *Avec une densité surfacique du stockage par batterie de 100 MWh/hect.*

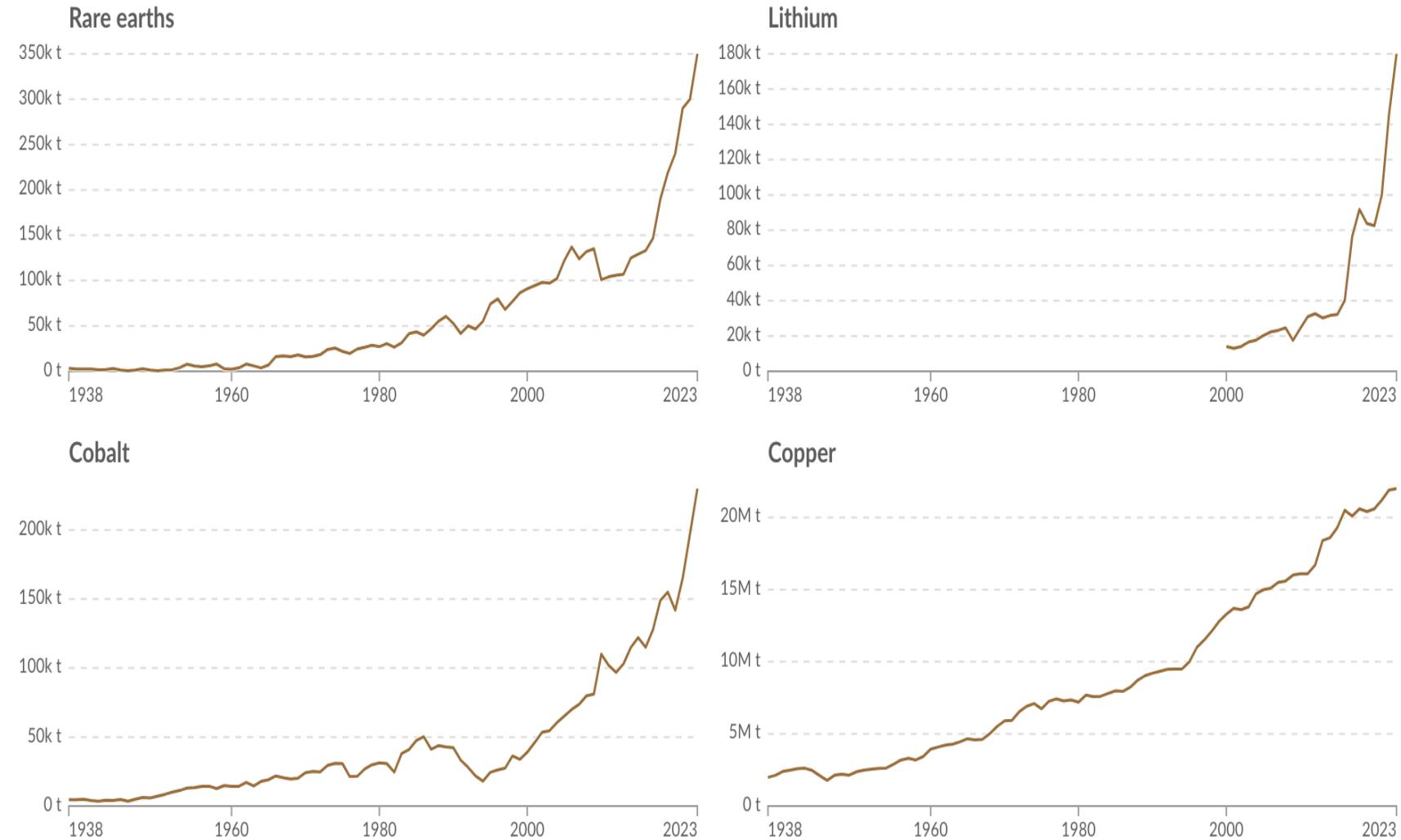
■ Problématique des ressources

Composition d'une batterie lithium-ion NMC811 de 60 kWh bruts:



Matière	Quantité (kg)
Cobalt	5
Lithium	5
Manganèse	5
Acier	20
Cuivre	20
Chimie (séparateur et électrolyte)	25
Autres matières	26
Aluminium	30
Nickel	39
Plastique	40
Graphite	45
Autres parties (boîtier, etc)	70
<i>Total</i>	330

■ Extraction des matériaux de la transition



■ Résumé des matières principales

Ressource	Usage principal	Pays dominants (production/raffinage)	Production annuelle mondiale (Mt)	Croissance annuelle production (%)	Réserve prouvées (Mt)	Année début tensions	Empreinte eCO ₂ (kgCO ₂ /kg)	Risque principal
Cuivre	Réseaux électriques, moteurs, électronique	Chili, Pérou, Chine	22	7.3 (<2035) 0.6 (>2035)	870	2035	4 - 6	Demande explosive dès 2030
Nickel	Batteries (NMC), inoxydable	Indonésie, Philippines, Russie	3.6	4.7(actuel) 3.5 (prév.)	100	2030 - 2040	5 - 15	Dépendance Asie, impact environnemental fort
Cobalt	Batteries lithium-ion	RDC (>70%), Chine (raffinage)	0.27	10.4	12	2030	28 (métal pur)	Concentration géopolitique, travail artisanal
Lithium	Batteries (VE, stockage)	Australie, Chili, Chine	0.21	9.6	28	2035	1 - 3 (salars) 3 - 5 (roche)	Raffinage concentré en Chine
Manganèse	Batteries (LMFP), aciers spéciaux	Afrique du Sud, Australie, Brésil	20	5.9	500	?	1 - 6	Assez abondant mais mal réparti
Graphite	Anodes batteries lithium-ion	Chine (>80%)	1.6	13	280	2030	20 - 30	Forte dépendance chinoise
Terres rares (Nd, Pr, Dy, Tb)	Aimants permanents (éoliennes, VE), électronique	Chine (>70%), Australie	0.37	?	peu clair	2030 - 2035	variables	Concentration quasi-monopole Chine
Gallium	Semi-conducteurs, LED, électronique	Chine (>95%)	610 tonnes		déjà 2023		Risque d'embargo (déjà en 2023) Contrôle géopolitique	
Germanium	Fibres optiques, capteurs infrarouges	Chine, Russie, Canada	140 tonnes		déjà 2023		Fort contrôle chinois Quotas chinois	
Indium	Écrans tactiles, photovoltaïque (CIGS)	Chine, Corée du Sud	?		?		Sous-produit du zinc, rare	
Platine / Palladium / Rhodium	Catalyseurs, hydrogène (pile à combustible, électrolyse)	Afrique du Sud, Russie	?		dès 2030, si H ₂ décolle		Risques géopolitiques, rareté	
Vanadium	Batteries à flux, aciers spéciaux	Chine, Russie, Afrique du Sud	0.1		2035 - 2040		Dépendance Chine	
Titane	Aéronautique, spatial, militaire	Chine, Russie	8.6 (ilmenite)		2035 - 2040		Dépendance Russie/Chine Tensions géopolitiques	
Tungstène	Alliages haute résistance, outils industriels	Chine (>80%)	0.078		?		Forte concentration Risque géopolitique	
Pétrole			33 Gbarils		1600 Gbarils		Fioul: 3.19	Ratio réserve/production: 40 - 50 ans
Gaz			115 Gm ³		?		2.14	Ratio réserve/production: 50 - 60 ans
Charbon			8.35 Gt				3.15	Ratio réserve/production: 100 - 200 ans

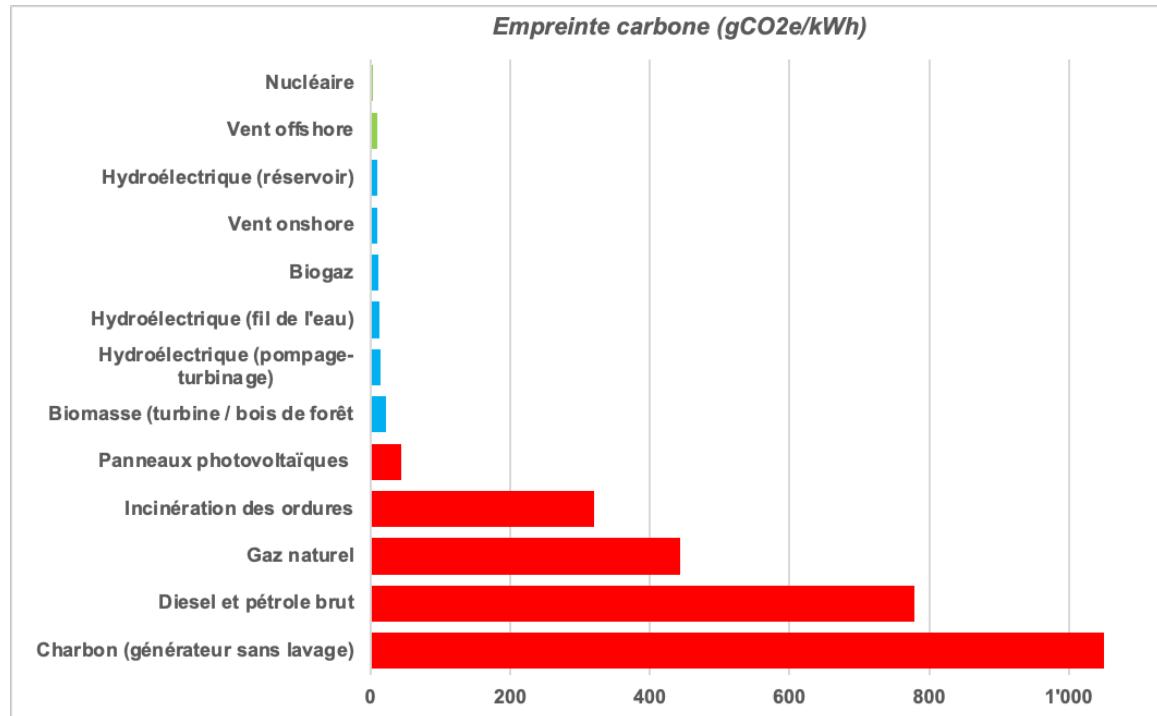
Notes:

- En général et sauf indication contraire, la croissance indiquée correspond à celle des décades précédentes. Lorsqu'une prévision pour 2035 ou 2050 est donnée, on se rend compte qu'en général elle poursuit (voire accentue légèrement) la croissance réelle de ces dernières années.
- Une croissance annuelle de 7.2 % signifie un doublement en 10 ans.



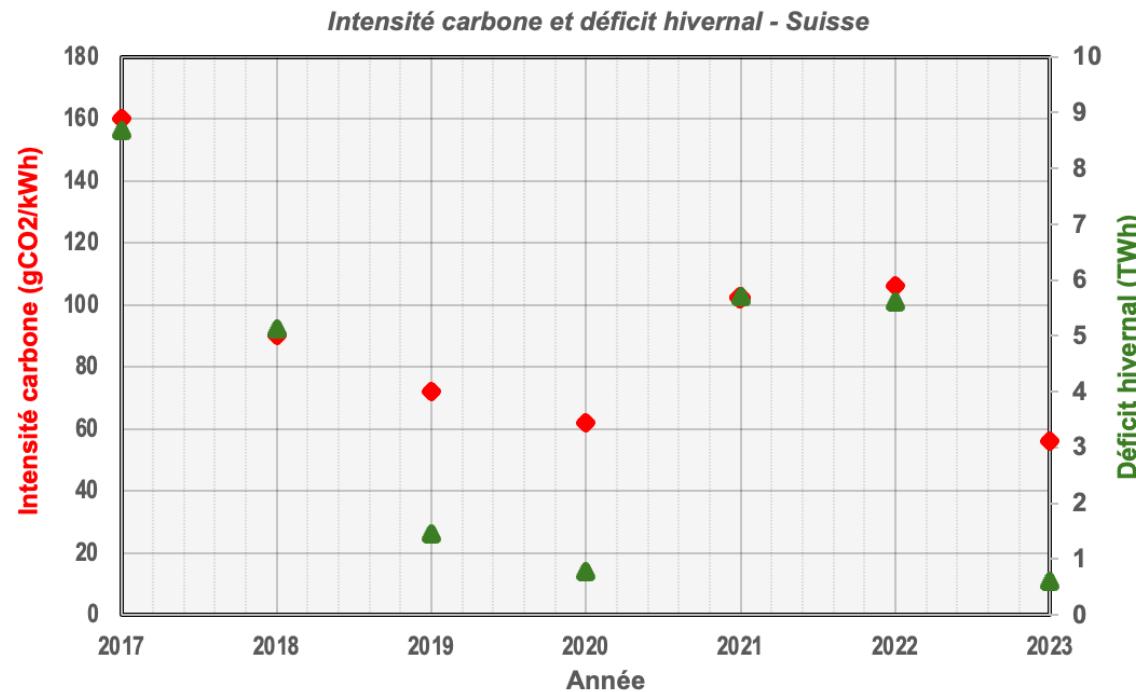
Intensité carbone (empreinte carbone)

■ Intensité carbone de l'électricité



Technologie	Empreinte carbone (gCO2e/kWh)
Nucléaire	4
Vent offshore	9
Hydroélectrique (réservoir)	10
Vent onshore	10
Biogaz	11
Hydroélectrique (fil de l'eau)	13
Hydroélectrique (pompage-turbinage)	14
Biomasse (turbine / bois de forêt)	22
Panneaux photovoltaïques	44
Incinération des ordures	320
Gaz naturel	443
Diesel et pétrole brut	778
Charbon (générateur sans lavage)	1050

■ Intensité carbone de l'électricité



Estimation par calcul:

$$I_{ce} = 46.3 + (12.4 * D_{hiv})$$

avec D_{hiv} : déficit hivernal en TWh

Pour l'électricité:

Intensité carbone suisse moyenne : $I_{cm} = 100 \text{ gCO}_2 \text{ par kWh}$

Intensité carbone mondiale : $I_{cm} = 481 \text{ gCO}_2 \text{ par kWh}$

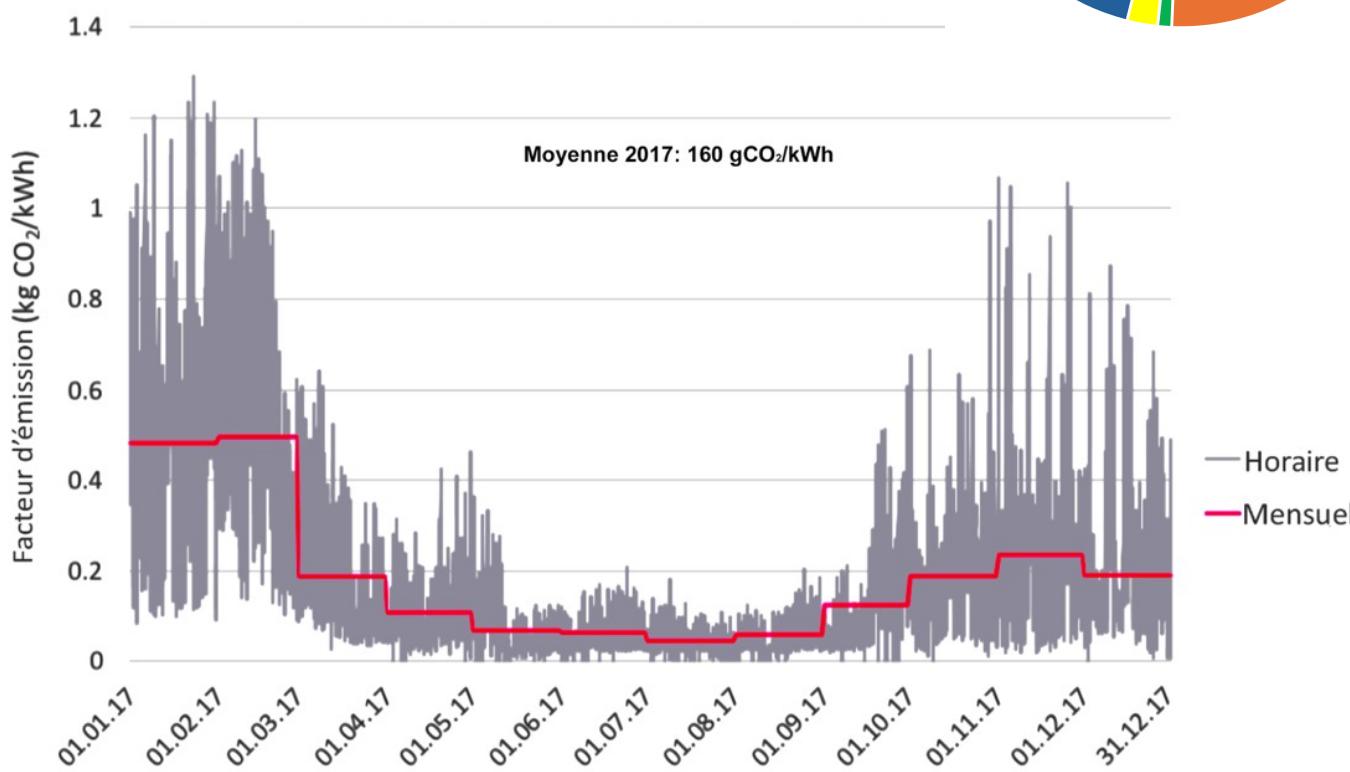
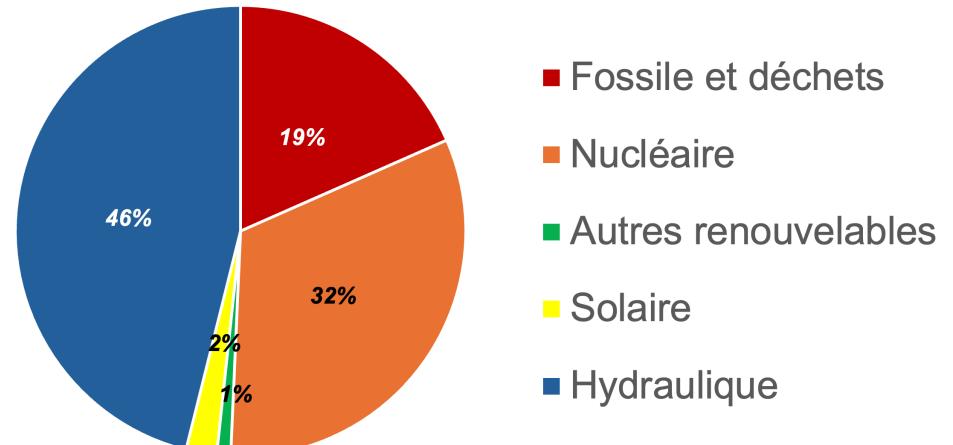
Pour l'énergie en général:

Intensité carbone suisse : $I_{cm} = 387 \text{ gCO}_2 \text{ par kWh}$

Intensité carbone mondiale : $I_{cm} = 220 \text{ gCO}_2 \text{ par kWh}$

■ Intensité carbone de l'électricité

Mix et intensité carbone de l'électricité suisse consommée (2017):



■ Source: énergie solaire

Intensité carbone totale pour des panneaux photovoltaïques actuels:

de toit de:

$$\rightarrow I_c \approx 40 - 45 \text{ gCO}^2\text{eq/kWh}$$

de façade:

$$\rightarrow I_c \approx 60 \text{ gCO}^2\text{eq/kWh}$$

■ Intensité carbone – exemple GHP

Données de base (installation centralisée):

- Installation de production / stockage hydrogène (GHP, Bulle)
- Production uniquement lors de surplus solaire : 60'000 kgH₂/an
- Investissement: 10 millions CHF
- Durée de vie: 15 ans.



■ Intensité carbone – exemple GHP

DONNEES								
Durée de vie de l'installation	15	ans						
Cout initiaux de construction	10'000'000	CHF						
Frais d'entretien et de personnel annuels	2	%	en % du cout initial					
Besoins annuels additionnels d'énergie	0	kWh						
Production maximum	38.5	kg/h						
Production annuelle H2	70'000	kg/an						
Puissance électrolyseur	2	MWe						
Empreinte carbone de l'énergie pour la construction	220	gCO2/kWh						
Empreinte carbone de l'énergie pour l'entretien et le personnel	387	gCO2/kWh						
Empreinte carbone de l'énergie d'approvisionnement (électrique)	40	gCO2/kWh						
Rendement électrolyseur	62	%						
Rendement stockage (compression)	92	%						
Facteur conversion H2->énergie	33	kWh/kg						
Consommation eau	20.0	l/kg						
Prix d'achat électricité	0.28	CHF/kWh						
Prix d'achat eau	2.00	CHF/m3						
Pour comparaison: prix de vente H2 à la pompe	20.00	CHF/kg						
RESULTATS CALCULS								
Energie H2 produite par année	2'310'000	kWh						
Energie H2 totale produite	34'650'000	kWh						
Energie de construction initiale	20'000'000	kWh						
Quantité eau requise, par année	1'400	m3/an						
Energie électrique nécessaire, par année	4'049'790	kWh/an						
			CHF/an	CHF/kg H2 produit	CHF/kWh H2	Equiv. énergie (kWh/kg)	gCO2/kg	gCO2/kWh
Amortissement de construction, par année	666'667	CHF/an						
Frais d'entretien et de personnel, par année	13'333	CHF/an						
Totaux amortissement annuels	680'000	CHF/an	9.5	0.29	19.0	4'190.5	127.0	
Frais de consommation eau	2'800	CHF/an	0.2	0.01	0.4	147.4	4.5	
Frais de consommation électrique	1'133'941	CHF/an	9.7	0.29	57.9	2'314.2	70.1	
TOTAUX			19.4	0.59	77.3	6'652.1	201.6	

■ Intensité carbone – exemple GHP

En résumé:

Intensité carbone production H₂ : $I_{cm} \approx 200 \text{ gCO}_2 \text{ par kWh}$

Si production électricité par pile combustible (48 %):

Intensité carbone finale : $I_{cm} = 220 / 0.48 = 458 \text{ gCO}_2 \text{ par kWh}$

A comparer avec :

Intensité carbone PV : $I_{cm} \approx 45 \text{ gCO}_2 \text{ par kWh}$

Intensité carbone électricité mondiale : $I_{cm} = 481 \text{ gCO}_2 \text{ par kWh}$

■ Intensité carbone – exemple stockage batterie Li-ion

Exemple du stockage pour maison individuelle: Tesla PowerWall2

DONNEES		
Capacité nette nominale totale	13.5	kWh
Empreinte carbone initiale (fabrication)	180	kgCO2/kWh
Durée de vie garantie	10	ans
Nbr cycles garantis	3600	cycles
Capacité en fin de garantie	70	%
Rendement aller-retour	90	%
Empreinte carbone de charge (PV)	44	gCO2/kWh
CALCUL		
Capacité moyenne sur tout le cycle	11.5	kWh
Energie totale produite (déchargée)	37'179	kWh
Consommation d'électricité de charge	41'310	kWh
Carbone produit pour la fabrication	2'430	kgCO2
Empreinte carbone due à la fabrication	65	
Empreinte carbone de fonctionnement	49	
Empreinte carbone totale	114	gCO2/kWh



Coûts

■ Coût du stockage par batteries Li



20 TWh de stockage saisonnier par batterie, c'est:	5'600 milliards CHF
--	---------------------

230 GWh de stockage journalier par batterie, c'est:	64 milliards CHF
---	------------------

→ Avec un coût du stockage par batterie de 280.- CHF/kWh



Batteries à remplacer tous les 10 – 12 ans !

■ Coût installations PV



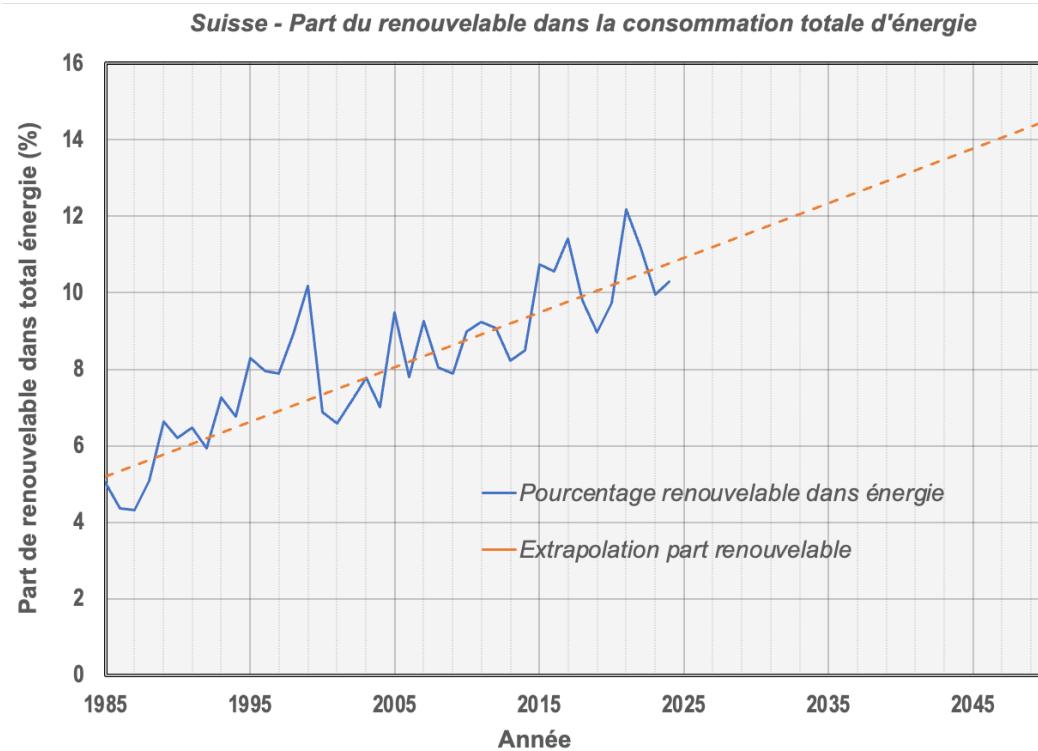
<i>Stratégie</i>	<i>Besoin PV (km²)</i>	<i>CAPEX PV (milliards CHF)</i>
Tout électrique	425	106
Hydrogène	1'030	260
Carburant synthétique	2'220	490

→ Pour comparaison: budget confédération suisse (2026): dépenses: 91 milliards CHF

► Neutre en carbone,
renouvelable:
vraiment ?

■ Part de renouvelable

En Suisse:



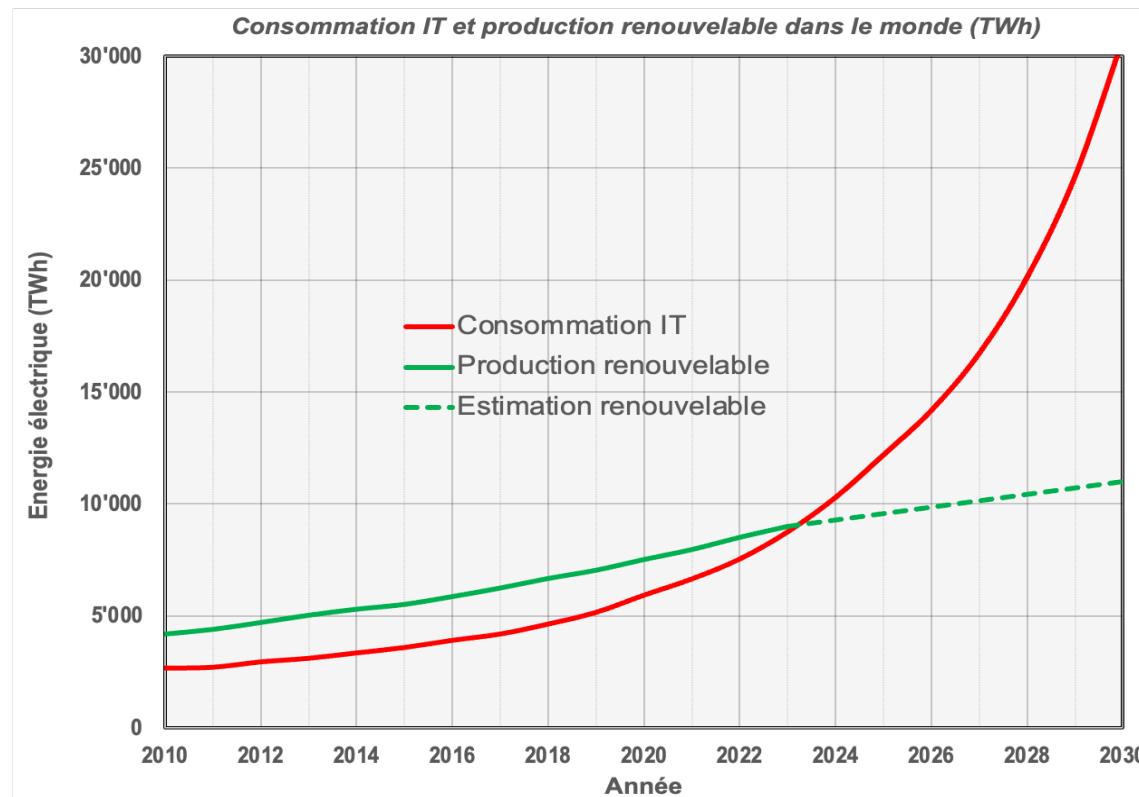
En conclusion, à utiliser pour les planifications, les ratios de renouvelable suivants:

2030: 12 %

2050: 15 %

et pas 100 % !

■ Renouvelable: vraiment disponible pour la transition?



- 2023 = année où la consommation du numérique a dépassé tout le renouvelable !
- Les prévisions montrent que, dans l'avenir, tout le renouvelable sera consommé par le numérique.
- **Quel renouvelable pour la transition énergétique ?**

■ Renouvelable ? Neutre en carbone ?

Vu dans une publication de Limeco (installation power-to-gas à Dietikon):

10 000 –15 000 MWh

d'électricité neutre en CO₂ provenant de l'UIOM sont disponibles chaque année.

Non, environ 320 gCO₂/kWh !



Type de déchets visibles à l'UIOM de Fribourg

Un site idéal

«L'usine d'incinération des ordures ménagères et la station d'épuration des eaux usées sont situées l'une à côté de l'autre. Limeco dispose donc de conditions idéales pour produire du gaz vert» expliqua Stefano Kunz, président du conseil d'administration de Limeco et membre du conseil communal de Schlieren. Cela fonctionne de la manière suivante : l'installation Power-to-Gas utilise l'électricité renouvelable produite par l'usine d'incinération des ordures ménagères pour produire de l'hydrogène. Celui-ci est mélangé avec le CO₂ contenu dans le gaz d'épuration pour obtenir du méthane renouvelable. À partir des déchets et des eaux usées, Limeco obtient ainsi une énergie renouvelable. Injecté dans le réseau de gaz existant, ce gaz neutre en CO₂ remplace les énergies fossiles.

Oui, renouvelable (et encore), mais pas neutre en CO₂ !

■ Renouvelable ? Neutre en carbone ?

Vu dans une publication de Aqua&Gas no 22, 2024 (GreenGas à Aigle):

seront sécurisés par la suite.

De l'énergie électrique renouvelable à la production de gaz de synthèse neutre en CO₂. A partir de l'énergie électrique produite par les panneaux photovoltaïques (5), un électrolyseur (6) transforme celle-ci en hydrogène. Cet hydrogène, combiné à une source de CO₂, est injecté dans un réacteur catalytique de méthanation (7) novateur, à haut taux de conversion. Il en ressort du méthane de synthèse, **neutre** en CO₂, qui est injecté dans le réseau de gaz pour une utilisation finale par des clients industriels/privés.

La sécurisation de l'approvisionnement

Pauvre en CO₂ peut-être,
mais pas neutre en CO₂ !



Conclusions

■ Conclusions

- Stockage électricité → énorme consommation de ressources et de place
- Besoin d'une très forte composante photovoltaïque
- Intensité carbone : à calculer de manière complète pour établir un bilan correct d'une nouvelle technologie – ne pas remplacer le pétrole par une technologie qui en "contient" encore plus!
- Considérer un mix électrique futur réaliste dans les évaluations, et pas un "100% renouvelable" qui n'existe pas
- Attention aux rendements surestimés (récupération de chaleur hypothétique)
- Prendre en compte l'intensité matérielle – attention aux pénuries futures
- Poursuivre les recherches scientifiques
- Amélioration isolation bâtiments = moins de stockage hivernal
- Sobriété = moins de stockage nécessaire !

- ▶ Merci de votre attention
- ▶ Questions ?

*Bertrand Daout
Ing. EPFL élec.
Chemin de la Montagne 6
1077 Servion
bertrand.daout@bluewin.ch*