

Intégration de la capture du CO₂ dans les bâtiments

Jacques Gilbert

Promoters: Prof. Dr. Ir. Grégoire Léonard ^a

Prof. Dr. Ir. Vincent Lemort ^b

^a *Products, Environment, and Processes (PEPs)*

^b *Laboratory of Applied Thermodynamics, Aerospace and Mechanical Engineering Department*

03/02/2026

Intégration de la capture du CO2 dans les bâtiments



Pourquoi ?



Comment ?



Avantages
Challenges



Conclusions




Le Thermomètre qui Explode



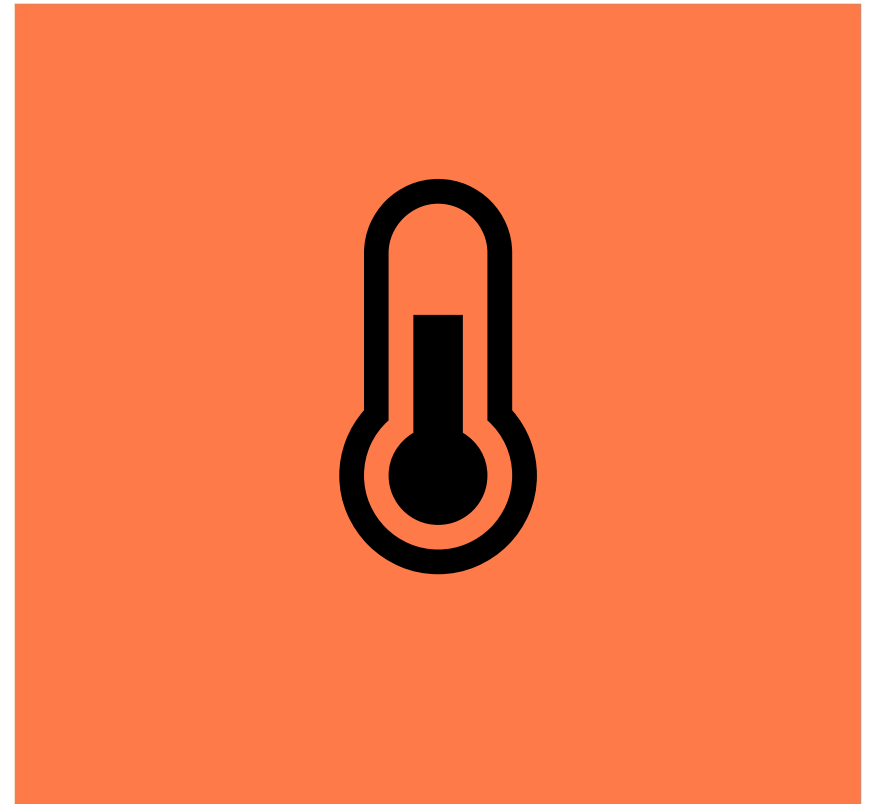
La température mondiale augmente

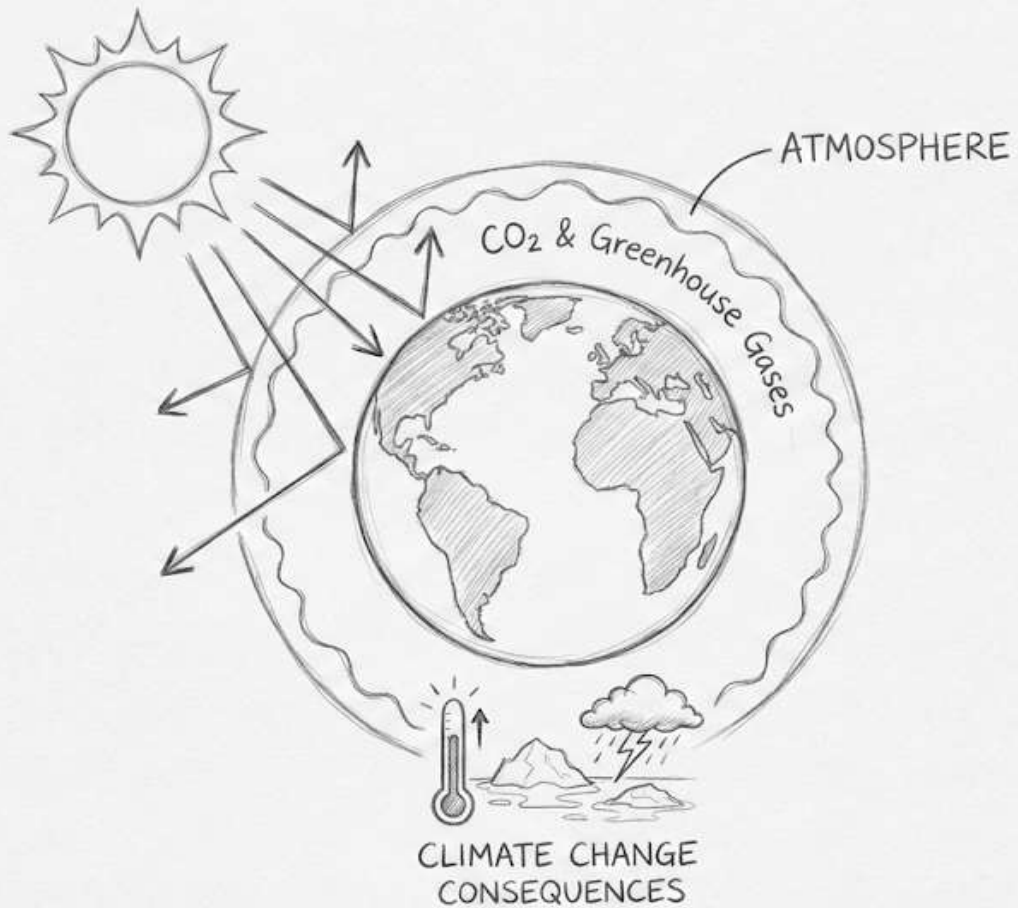
 +1.1°C depuis l'ère pré-industrielle

 Les années 2015-2023 sont les plus chaudes jamais enregistrées

 Objectif : limiter à +1.5°C

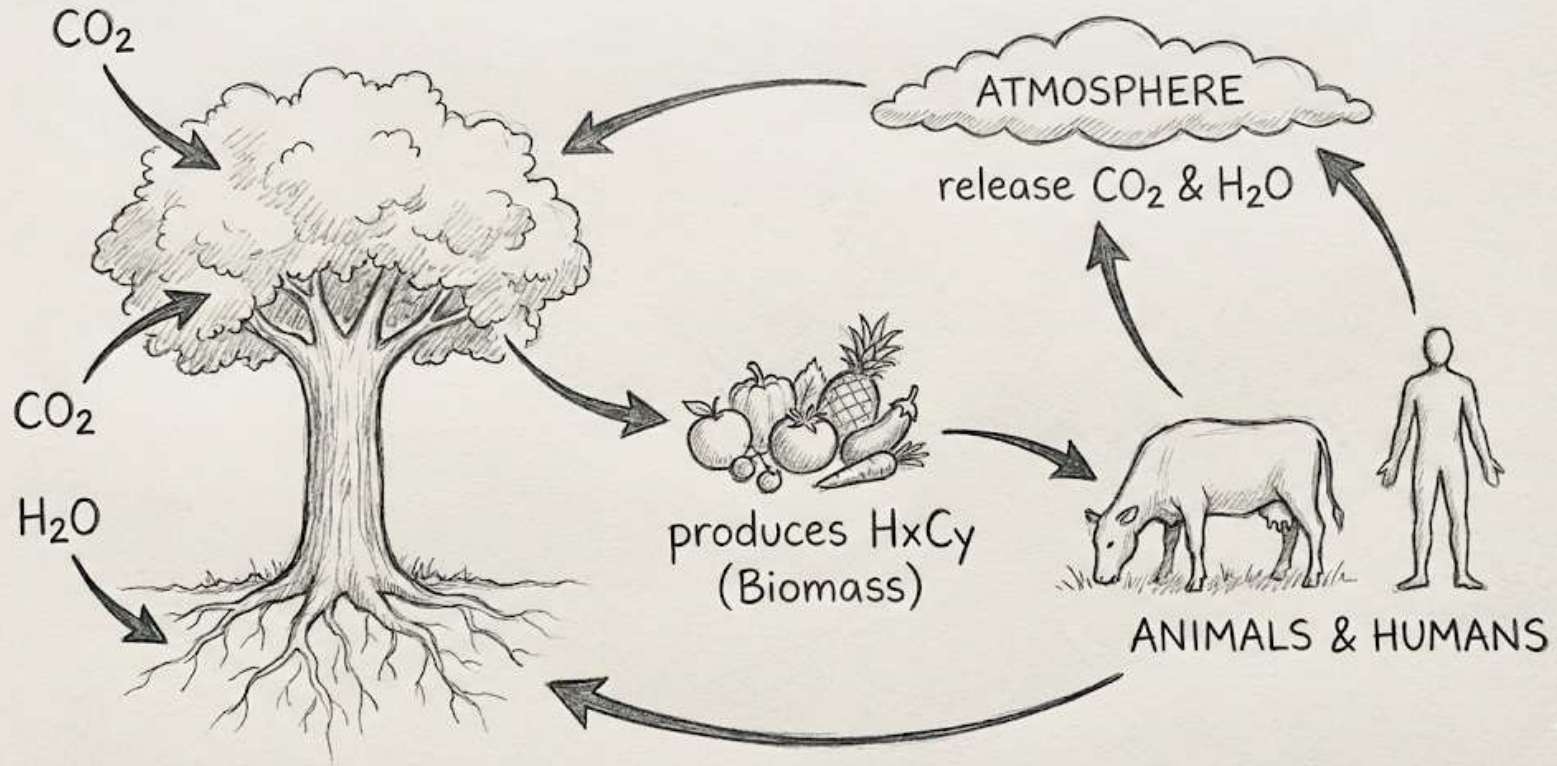
 Réalité : on file vers +2.7°C

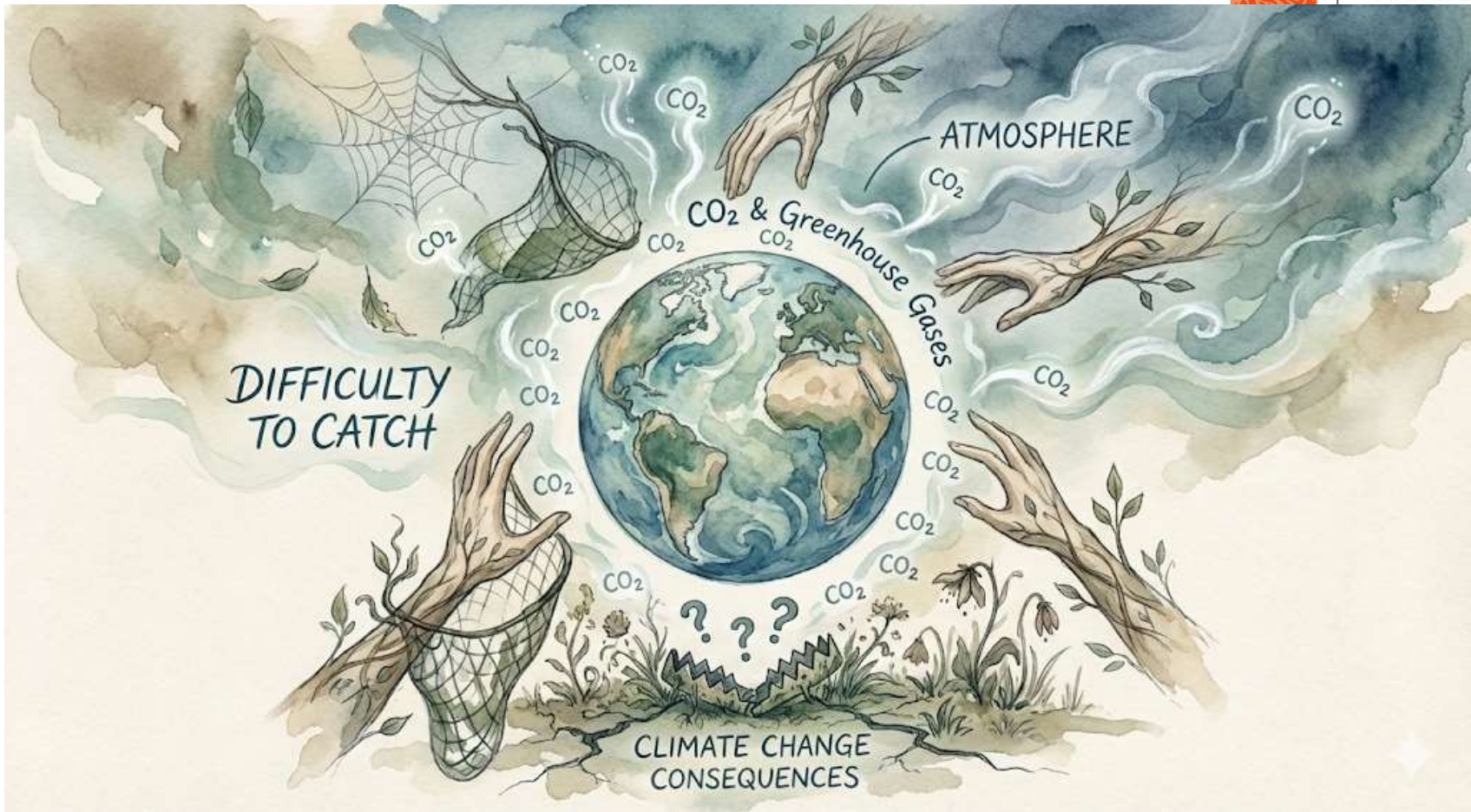






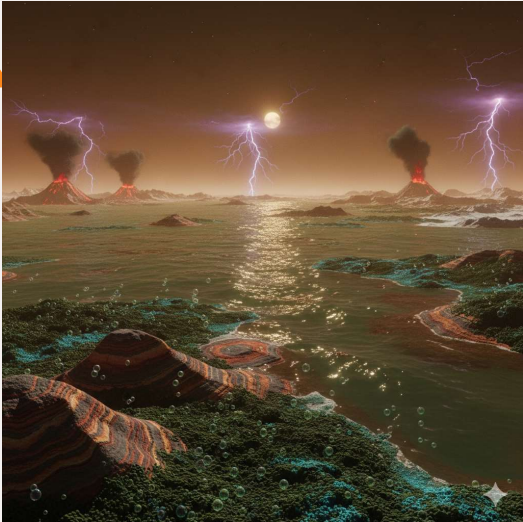
THE CO₂ CYCLE





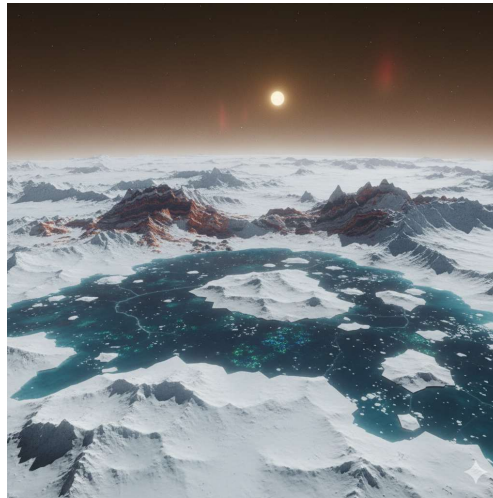
Au tout début : la première extinction de masse

H₂O CH₄ CO₂



Avant – 2.4 MMM années
T = 30 à 60 deg

H₂O CH₄ → O₂ CO₂



- 2.4 MMM années
T = -50 deg



H₂O CO₂ O₂

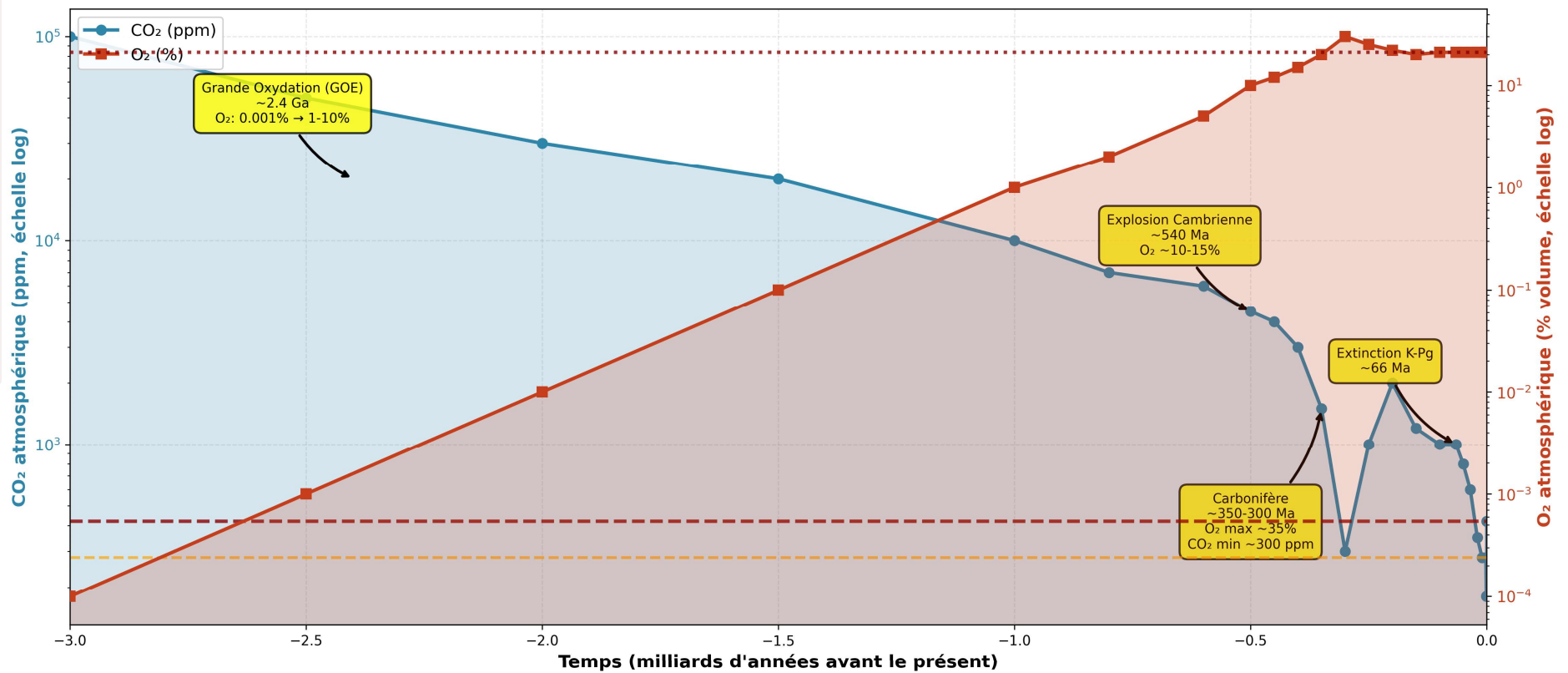


- 500 MM années

L'introduction de cyanobactéries il y a 2.4 milliards d'année a démarré la production d'oxygène par la photosynthèse.

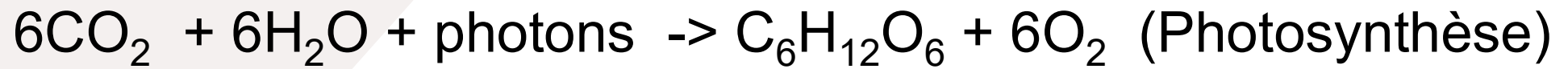


Évolution des concentrations de CO₂ et O₂ atmosphériques - Derniers 3 milliards d'années

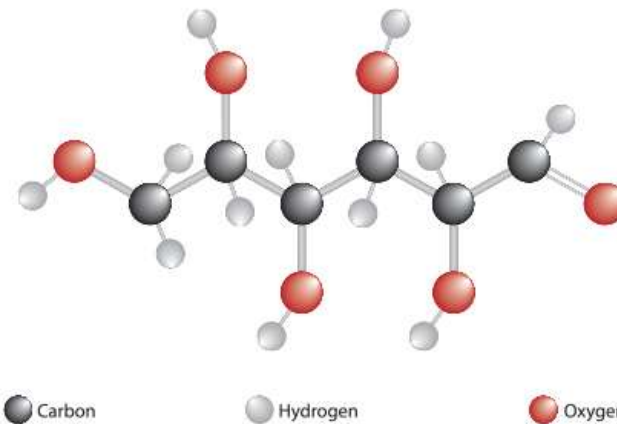


Note: Les concentrations avant -500 Ma sont très incertaines et basées sur des proxies géochimiques (paléosols, isotopes, rapports élémentaires, etc.)
La Grande Oxydation (~2.4 Ga) marque la transition d'une atmosphère réductrice à oxydante. Le pic d'O₂ au Carbonifère (~35%) a permis les insectes géants.

La composition de l'atmosphère est le résultat d'équilibres changeants



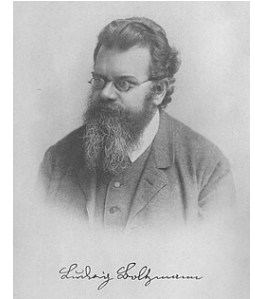
Glucose - $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$



L'énergie désigne une grandeur fondamentale mesurant l'état d'un système et sa capacité à modifier d'autres systèmes en transférant de la chaleur ou du travail

Principe de Lotka (1922)

« Boltzmann a souligné que l'objet fondamental de la lutte pour la vie, dans l'évolution du monde organique, est l'énergie disponible.



Conformément à cette observation, le principe veut que, dans la lutte pour l'existence, l'avantage revienne aux organismes dont les dispositifs de capture d'énergie sont les plus efficaces pour diriger l'énergie disponible vers des canaux favorables à la préservation de l'espèce. »



Ludwig Boltzmann (1844 -1906) mathématicien et physicien autrichien

Alfred James Lotka (1880 –1949) mathématicien, physico-chimiste et statisticien américano-polonais, célèbre pour ses travaux sur la dynamique des populations et l'énergétique.



-500 000
Maitrise du feu



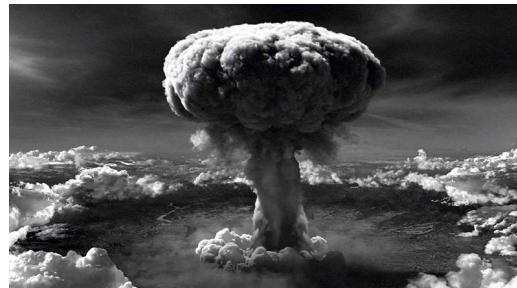
-10 000
Sedentarisation



1600-1700



2 000
Internet, IoT, IA,..



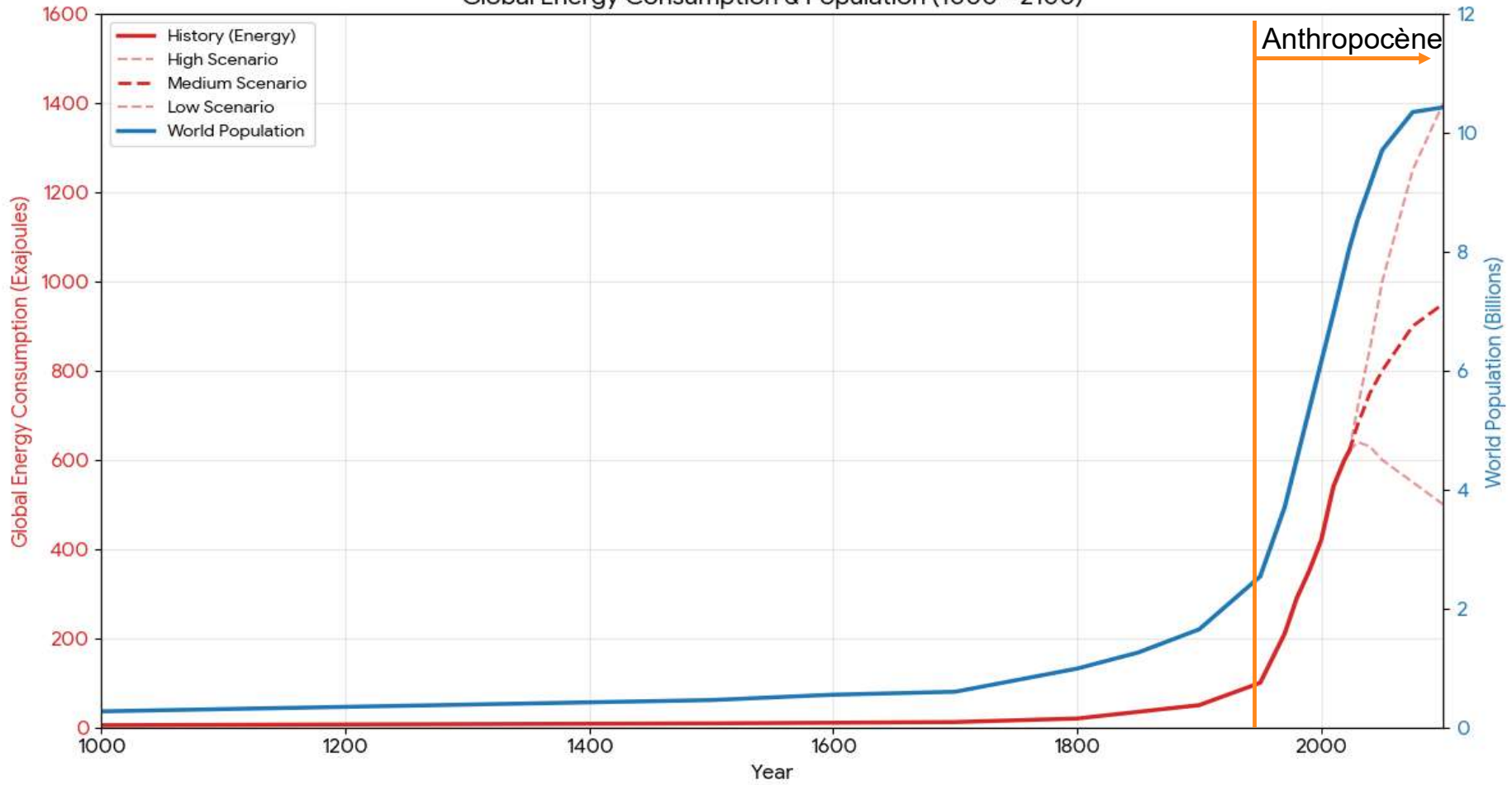
1950
Anthropocene



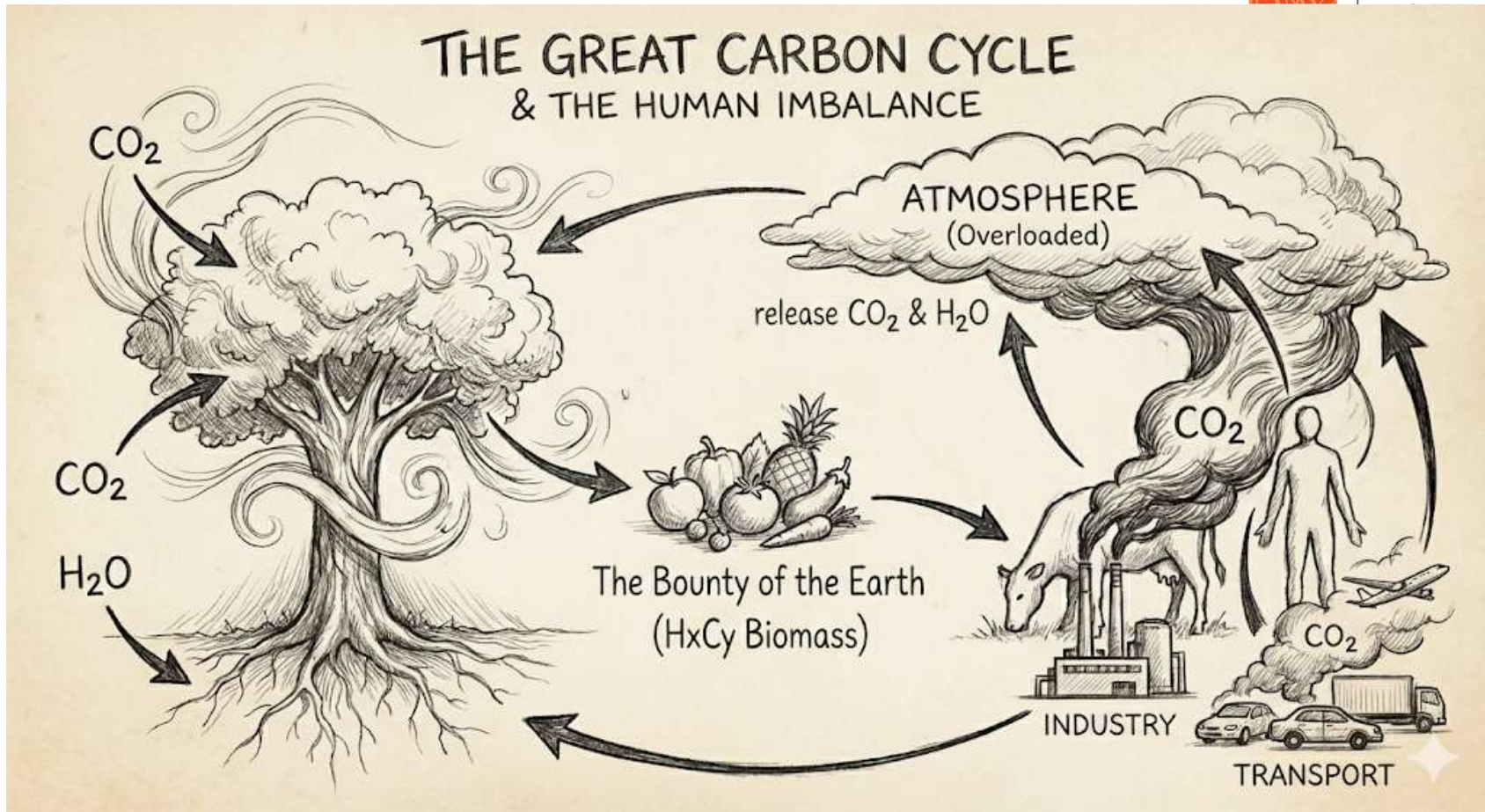
1 800
Revolution industrielle



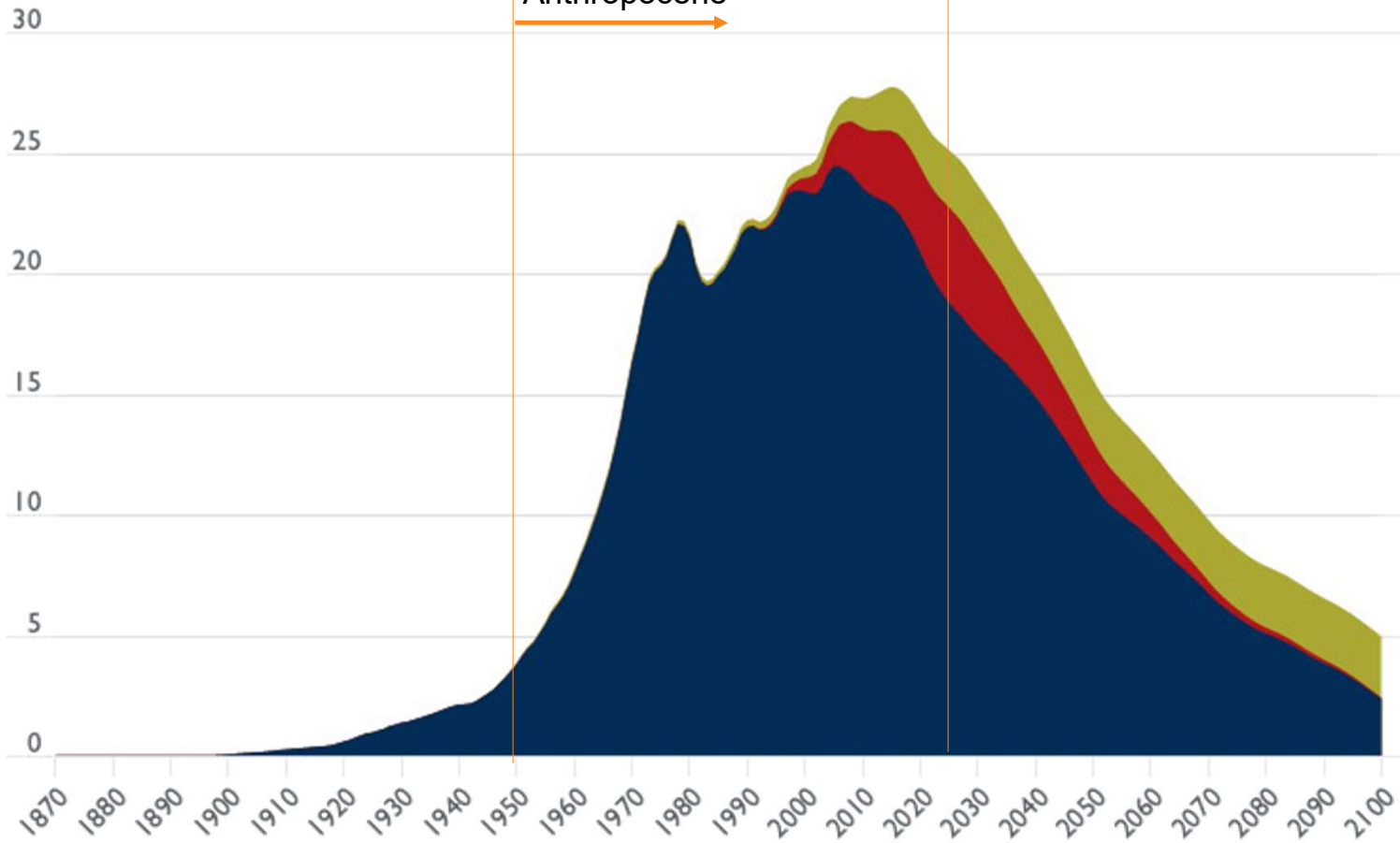
Global Energy Consumption & Population (1000 - 2100)



Anthropocène



Production mondiale de liquides (10⁹ barils/an)



- Lourd
- Profond
- Conventiennel

Presque tous les pays disposent de suffisamment de soleil, de vent ou d'eau pour devenir autosuffisants sur le plan énergétique.

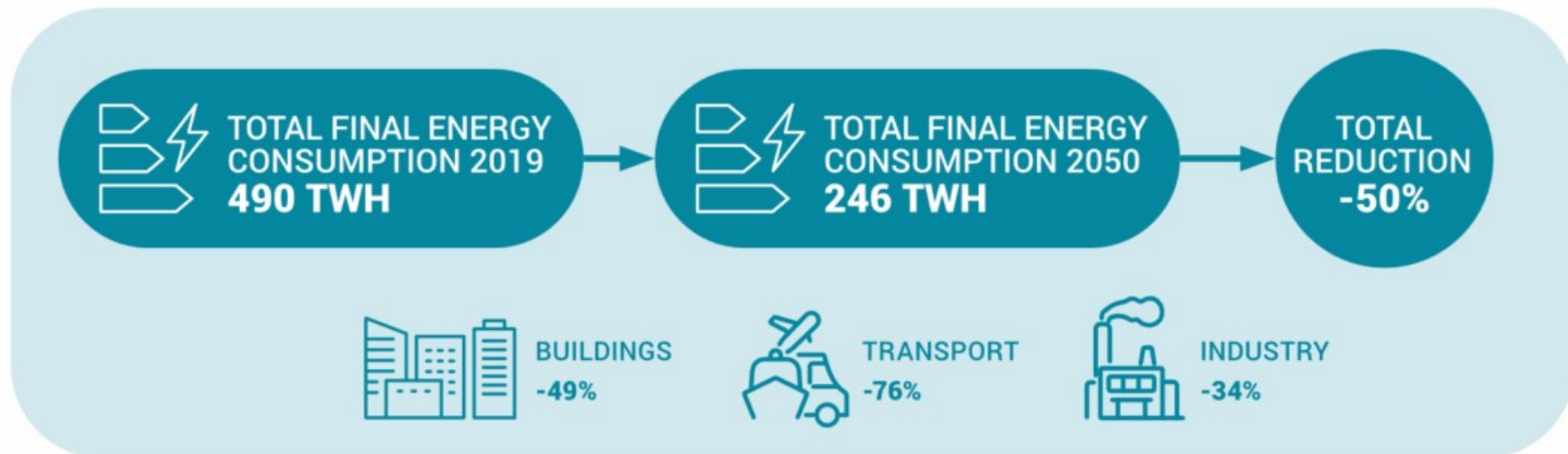
ANTÓNIO GUTERRES, United Nations Secretary-General





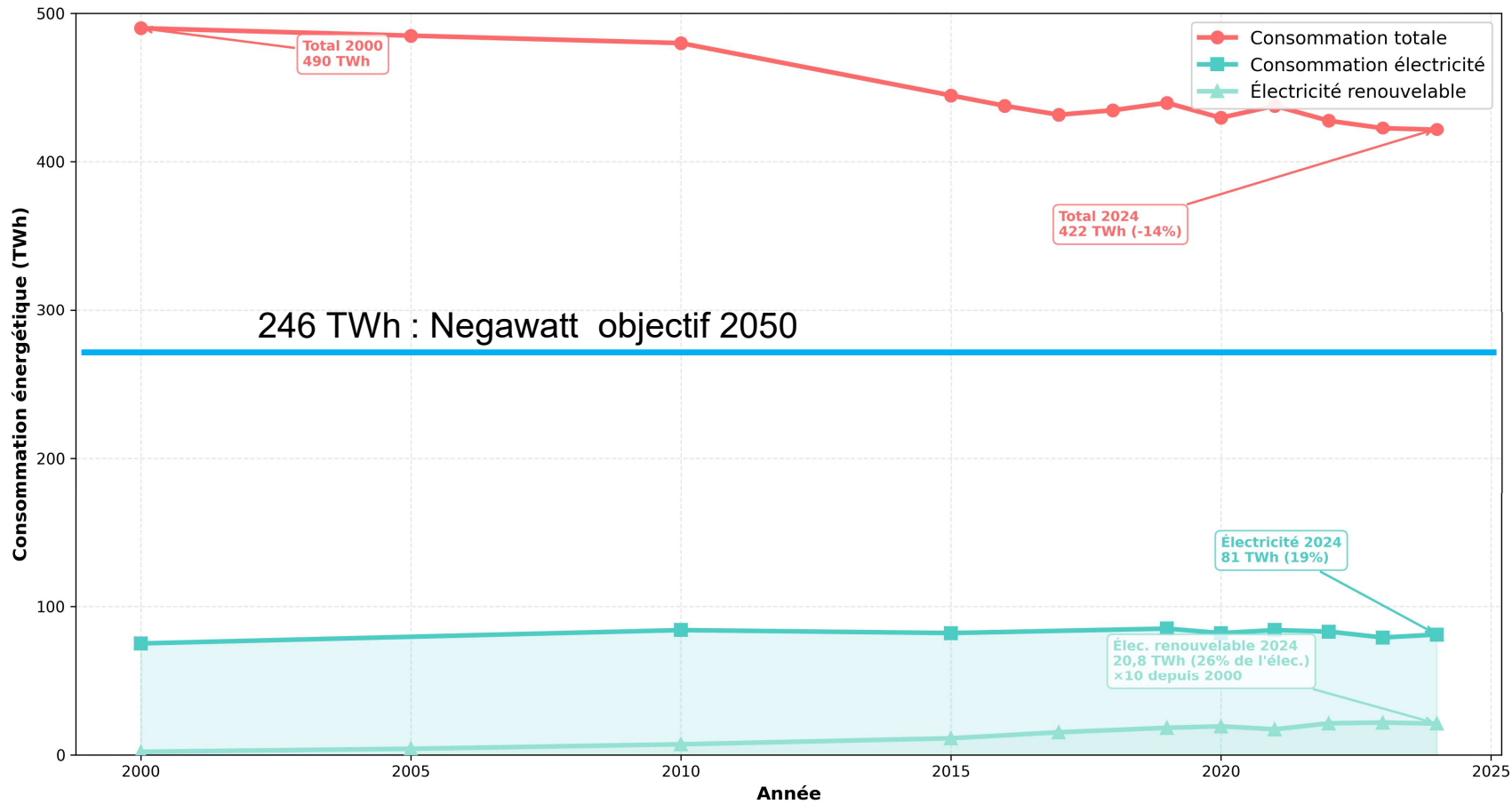
Le scénario Negawatt

- ▶ Mise en place d'une politique de maîtrise de la demande énergétique basée sur :
 - ▶ L'efficacité
 - ▶ Le renouvelable
 - ▶ La suffisance





Évolution de la consommation énergétique en Belgique (2000-2024)



Sources: SPF Économie, Statbel, IWEPS, CREG, APERe, FEBEG (2000-2024) | Élec. renouvelable = éolien + solaire + hydro + biomasse électrique

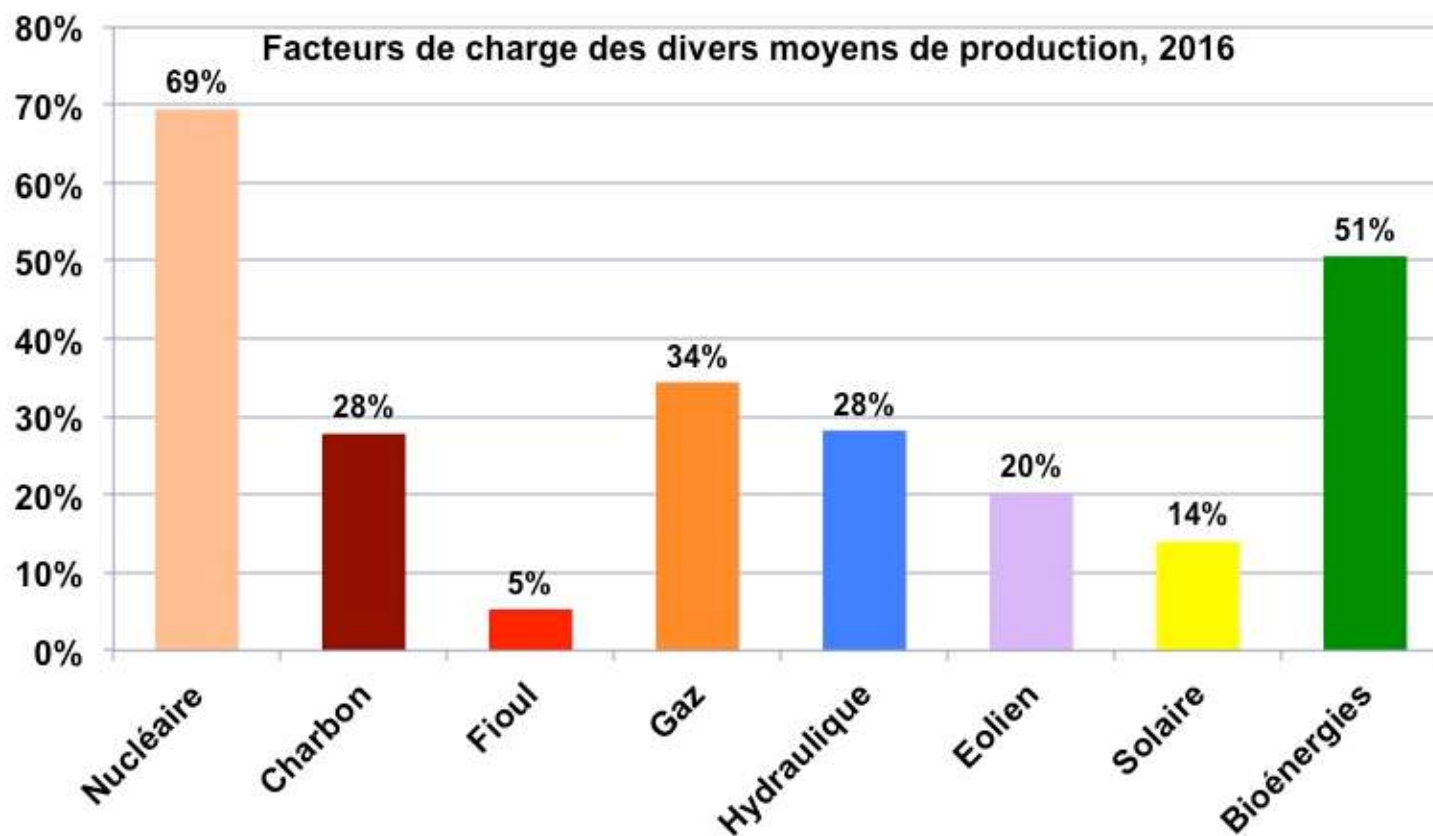
100 % d'électricité renouvelable sans frais supplémentaires, un jeu d'enfant ?

Jean Marc Jancovici

(Ingénieur français, diplômé de l'École polytechnique, créateur du bilan carbone)



Le facteur de charge d'une installation est le *ratio* entre l'énergie qu'elle produit réellement sur une période (ex: une année) et l'énergie qu'elle aurait pu produire si elle avait fonctionné à sa puissance maximale (crête) en continu 24h/24.

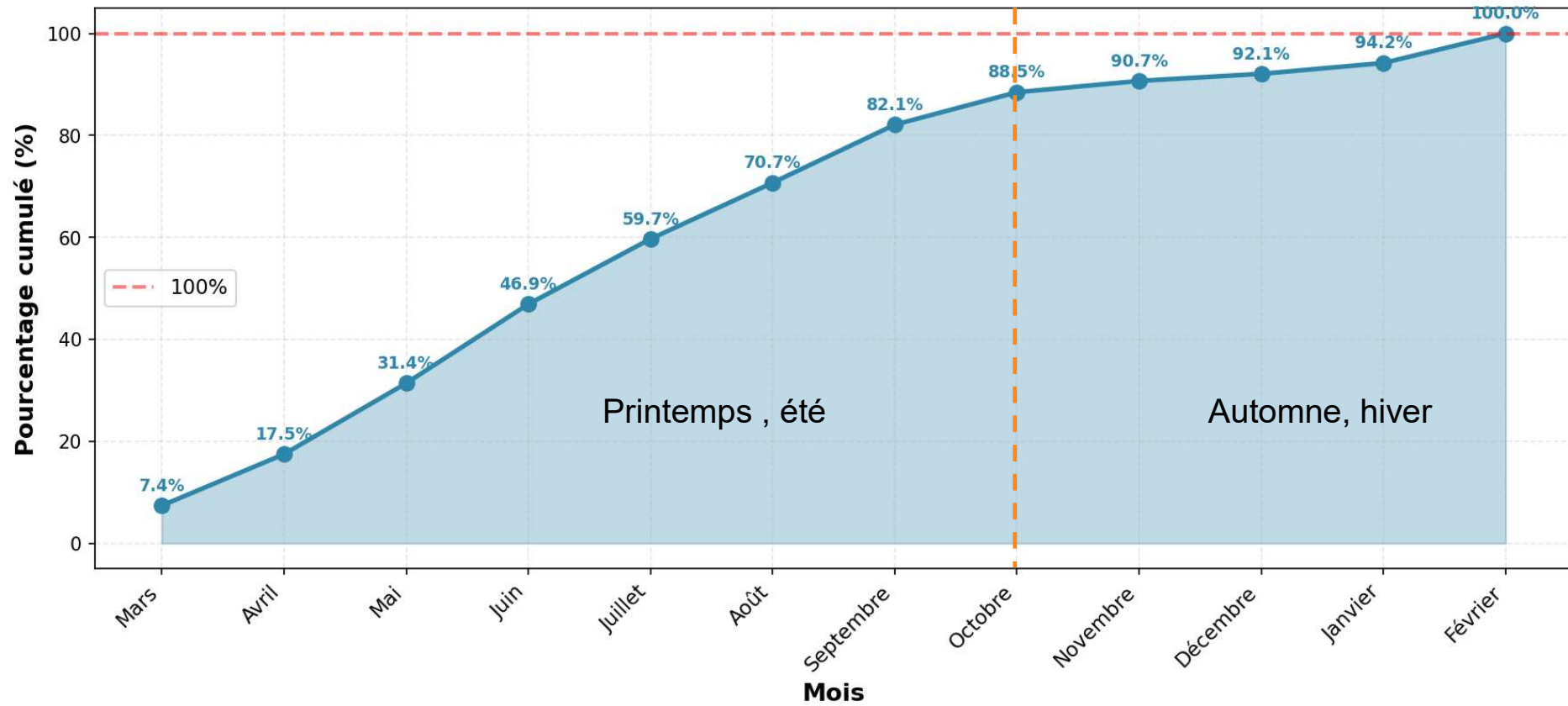


Source : <https://jancovici.com/transition-energetique/renouvelables/100-renouvelable-pour-pas-plus-cher-fastoche/>

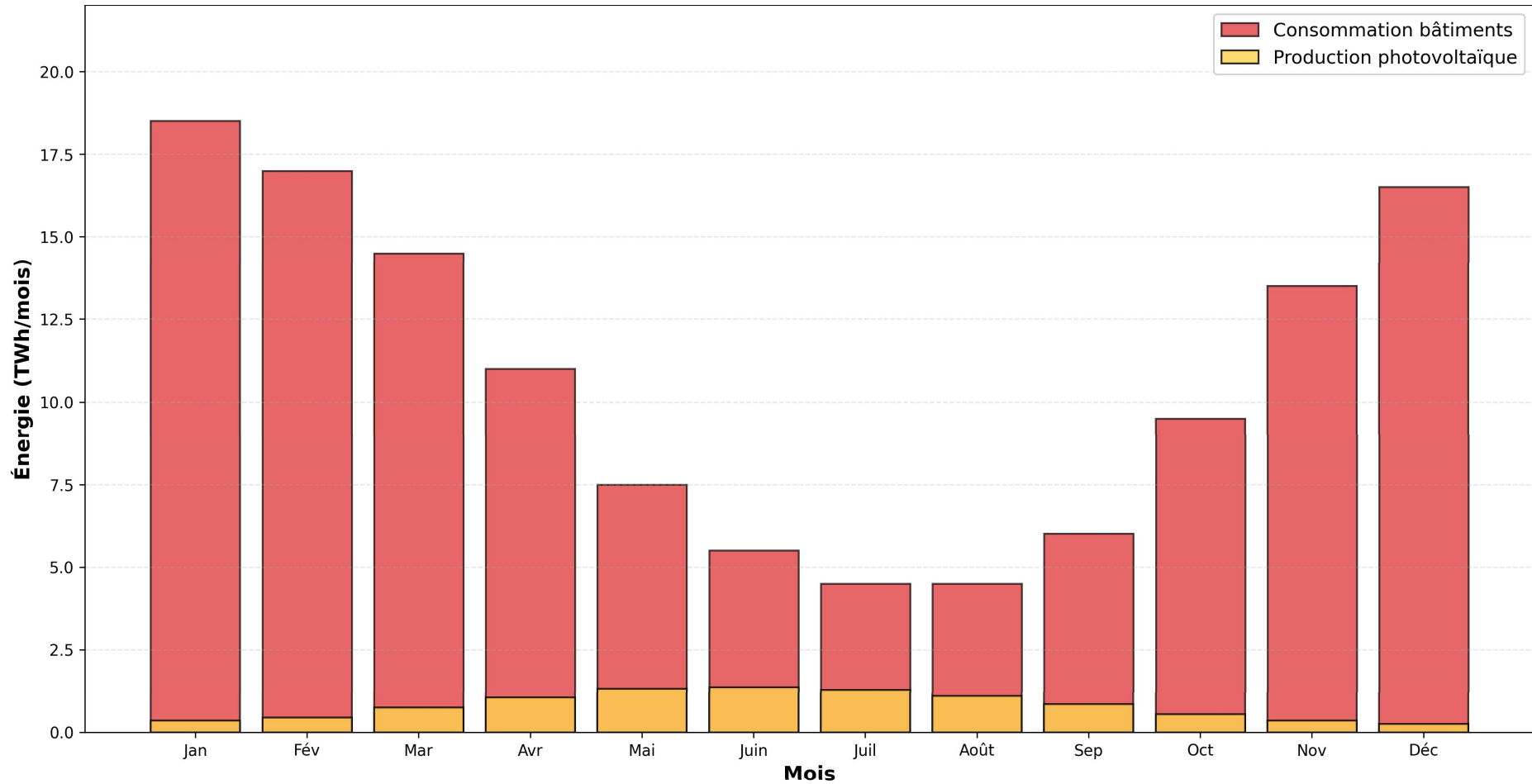
En Belgique un panneau photo voltaïque produit 80%
de son énergie pendant 25% du temps



Production photovoltaïque cumulée

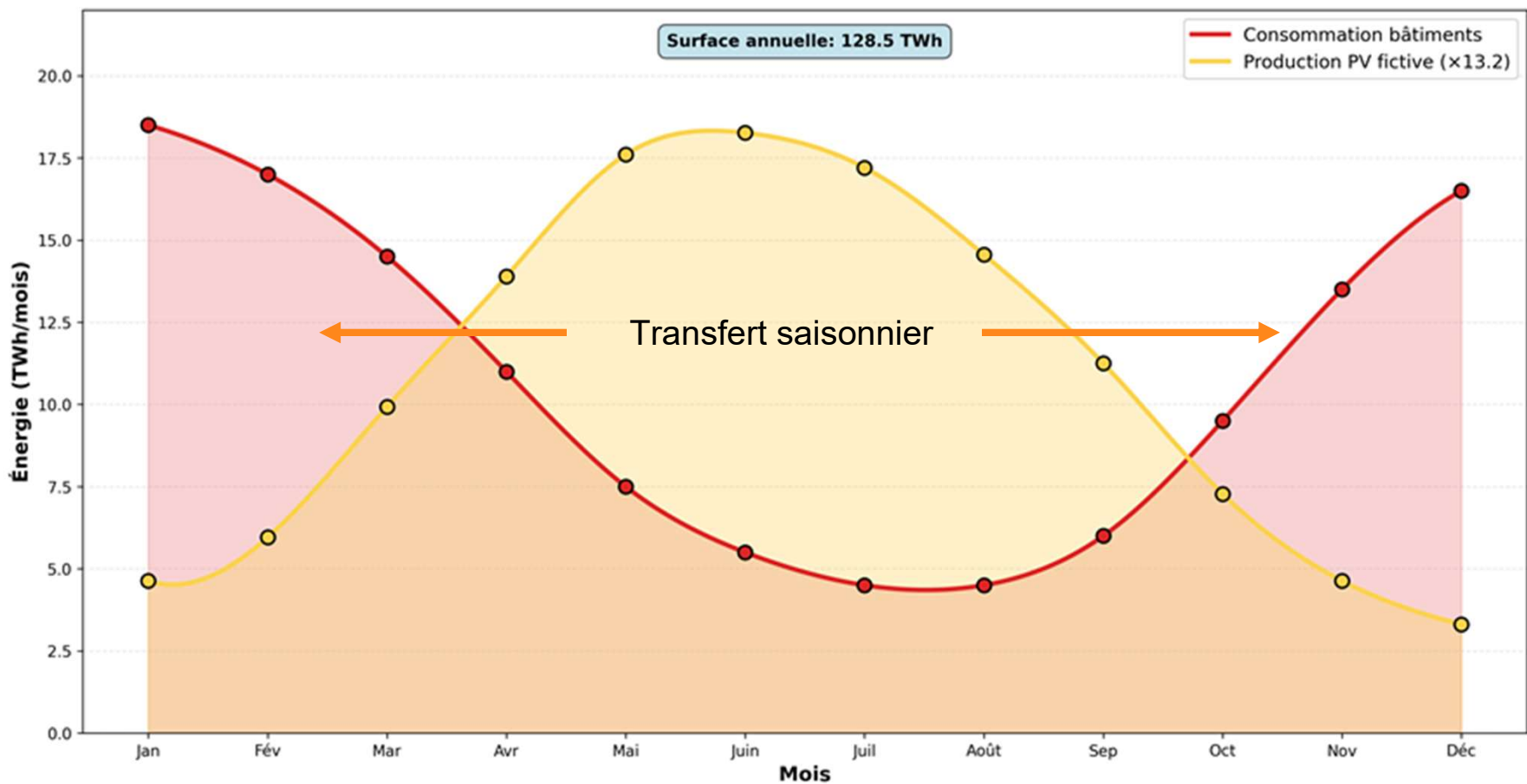


Décalage saisonnier: Consommation des bâtiments vs Production photovoltaïque en Belgique



Sources: SPF Économie (consommation bâtiments & production PV 2024-2025), Heat-me.be (profils saisonniers), CWAPE & CREG | Ce décalage inversé illustre le besoin critique de stockage saisonnier d'énergie

Décalage saisonnier: Consommation vs Production PV à surface équivalente (Capacité PV requise: 13.2× la capacité actuelle)



Sources: SPF Économie (consommation bâtiments & production PV 2024-2025), Heat-me.be, CWaPE & CREG
La courbe PV fictive montre la capacité solaire nécessaire pour égaler la consommation annuelle des bâtiments



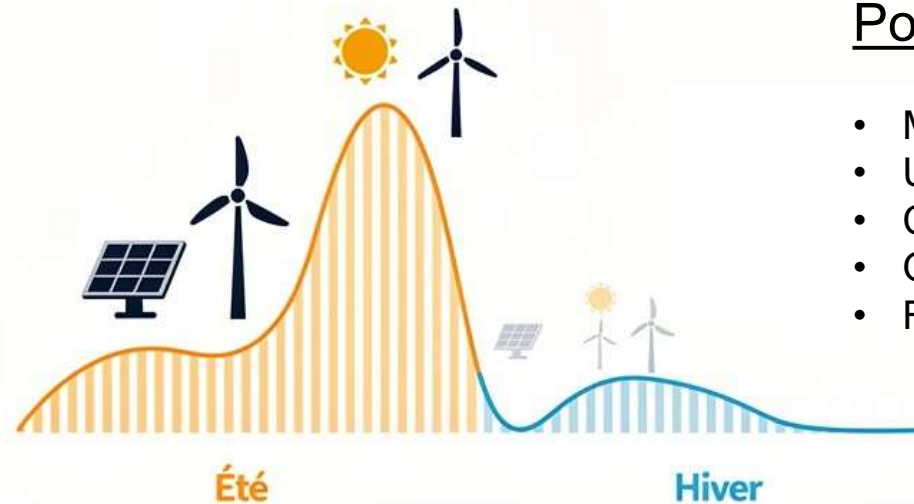
PEPs
CHEMICAL
ENGINEERING



Scénario	Facteur PV	Capacité requise	Production annuelle	Gaspillage
AVEC stockage saisonnier	X 13.2	132 GW	128.5 TWh	0%
SANS stockage	X 66	660 GW	640.9 TWh	80%



Le stockage saisonnier de l'énergie, une clé pour maximiser les ENR



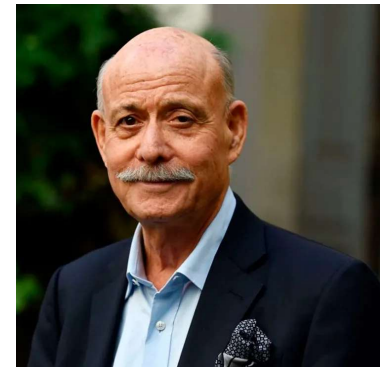
Pourquoi un stockage saisonnier ?

- Minimiser les effets des «trous noirs»
- Utiliser la surproduction estivale
- Compenser le manque hivernal
- Optimiser le facteur de charge
- Réduire le recours aux énergies fossiles

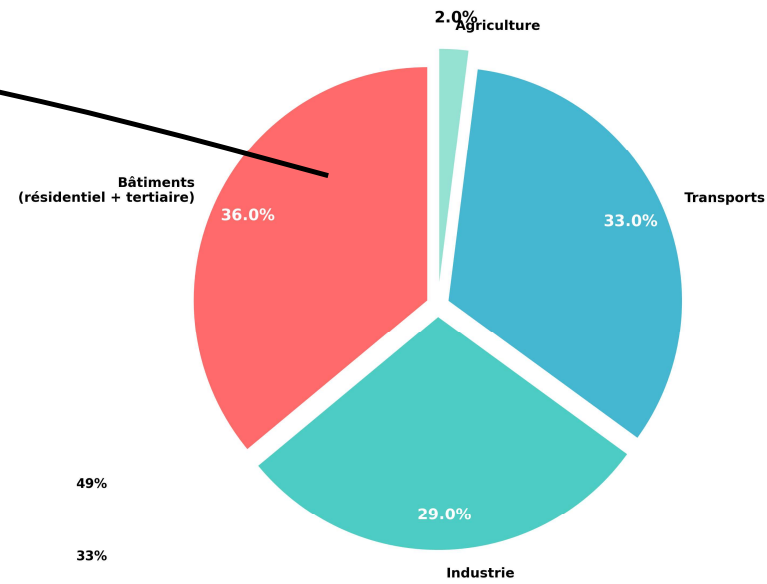
Conclusion : le stockage saisonnier est indispensable pour utiliser le solaire et l'éolien tout au long de l'année.

« Le mouvement de la construction écologique est à l'avant-garde de la troisième révolution industrielle, où les bâtiments deviennent des centrales électriques qui collectent, stockent et distribuent l'énergie renouvelable à l'échelle locale et régionale. »

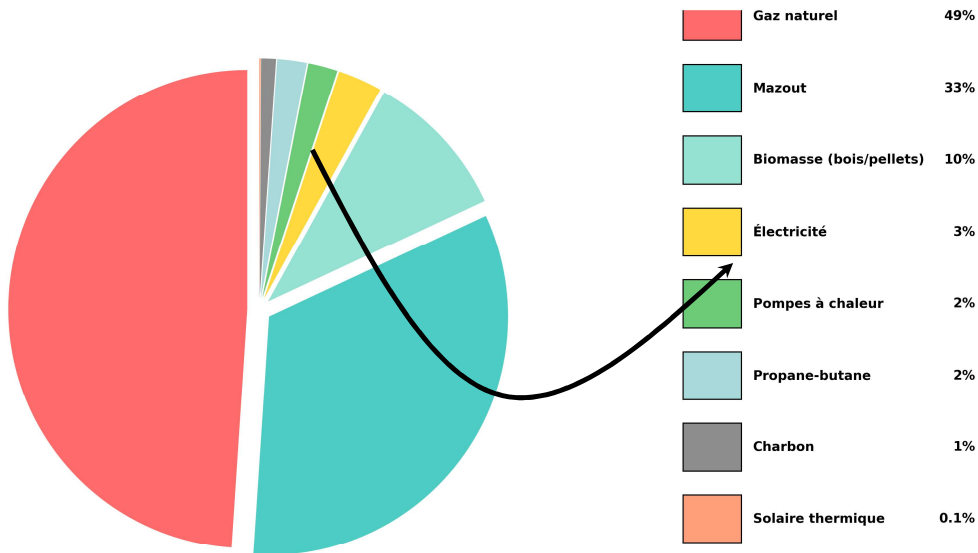
Jeremy Rifkin (théoricien économique et social américain, écrivain, conférencier, conseiller politique et activiste.)



Répartition de la consommation énergétique finale en Belgique

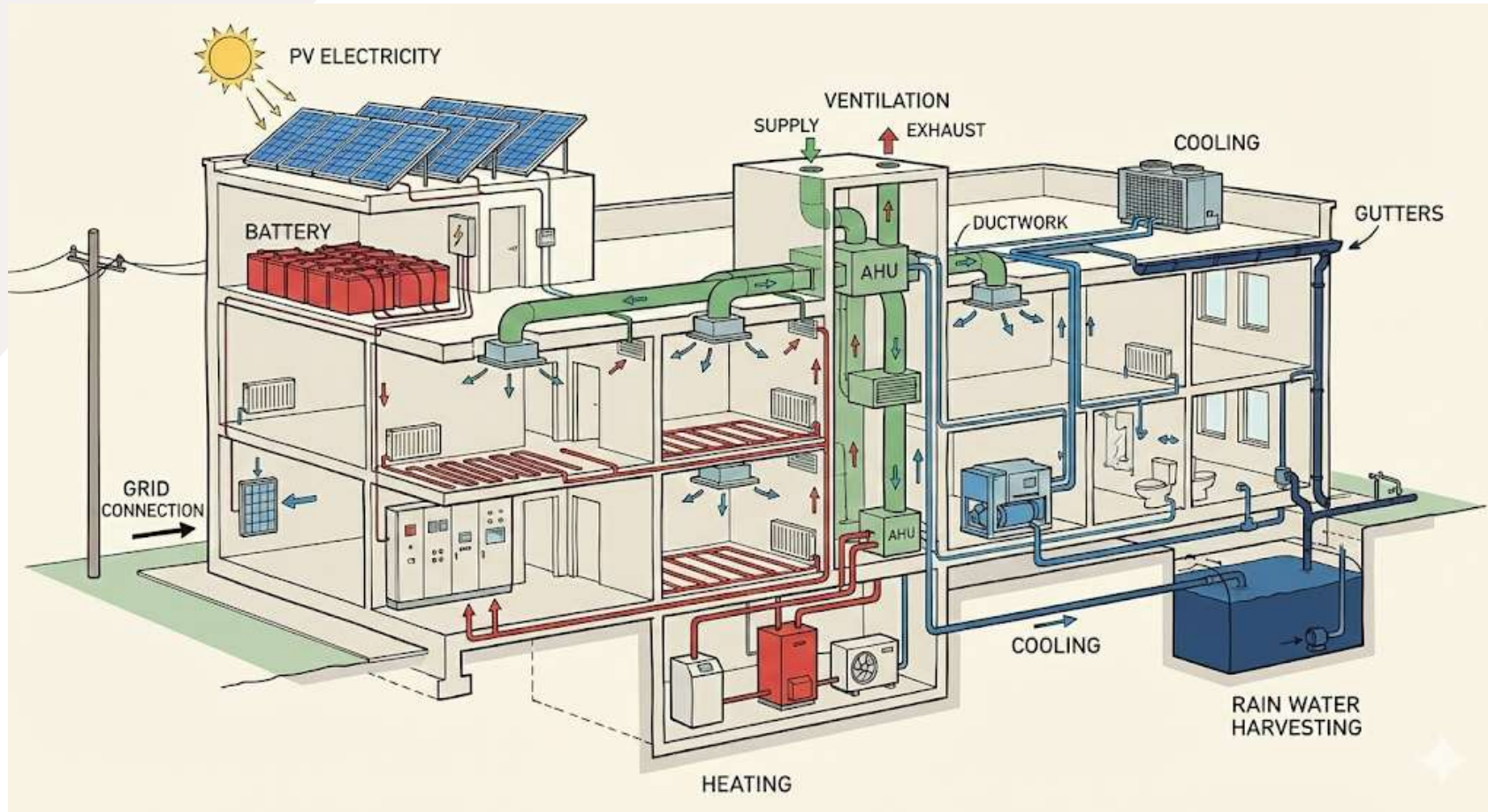


Sources d'énergie pour le chauffage des bâtiments résidentiels en Belgique (2021)



Source: SPF Économie - Analyse de la consommation énergétique des ménages 2021

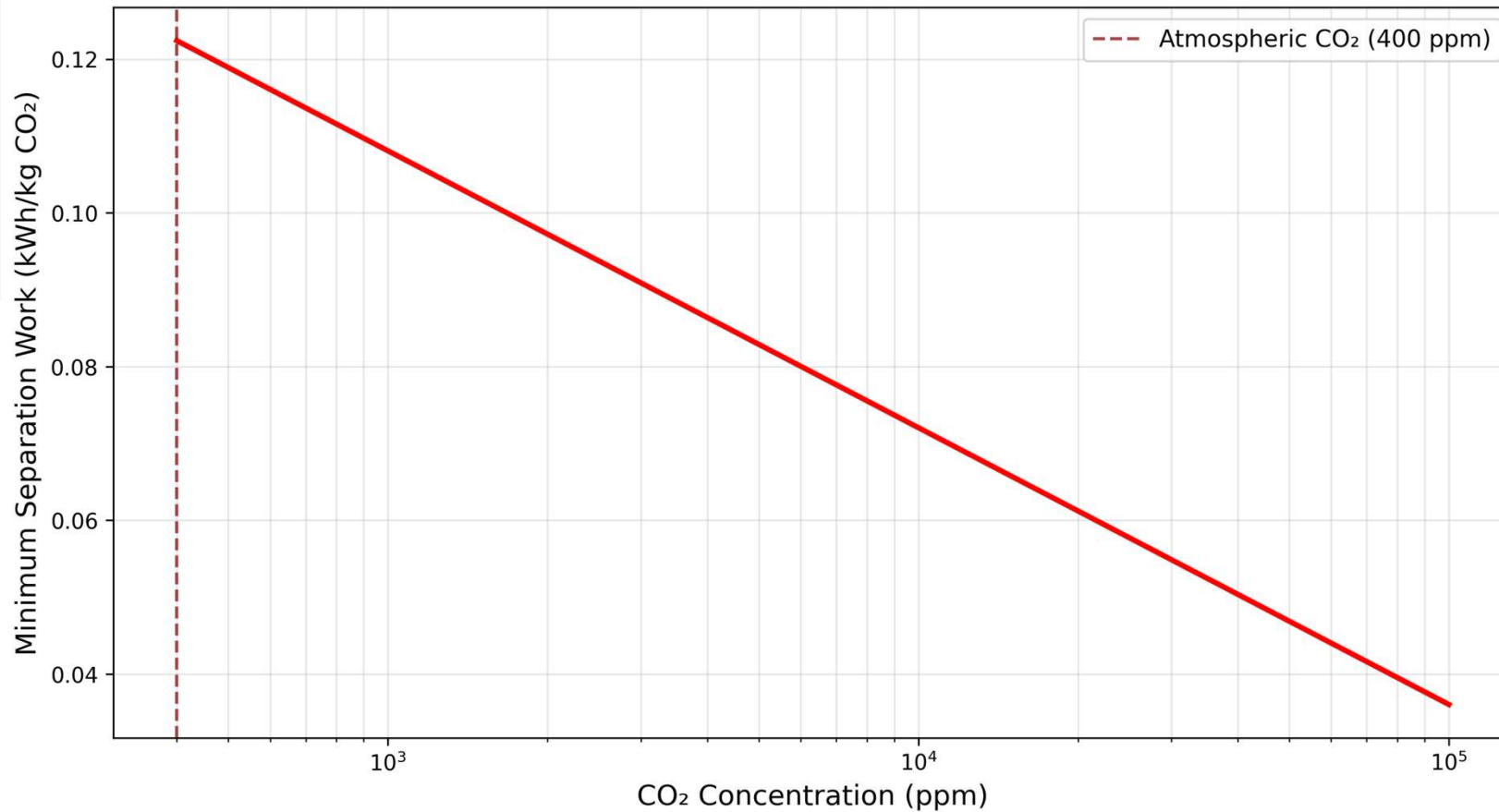
Quelle synergies possibles entre la capture du CO₂ et les différents systèmes ?



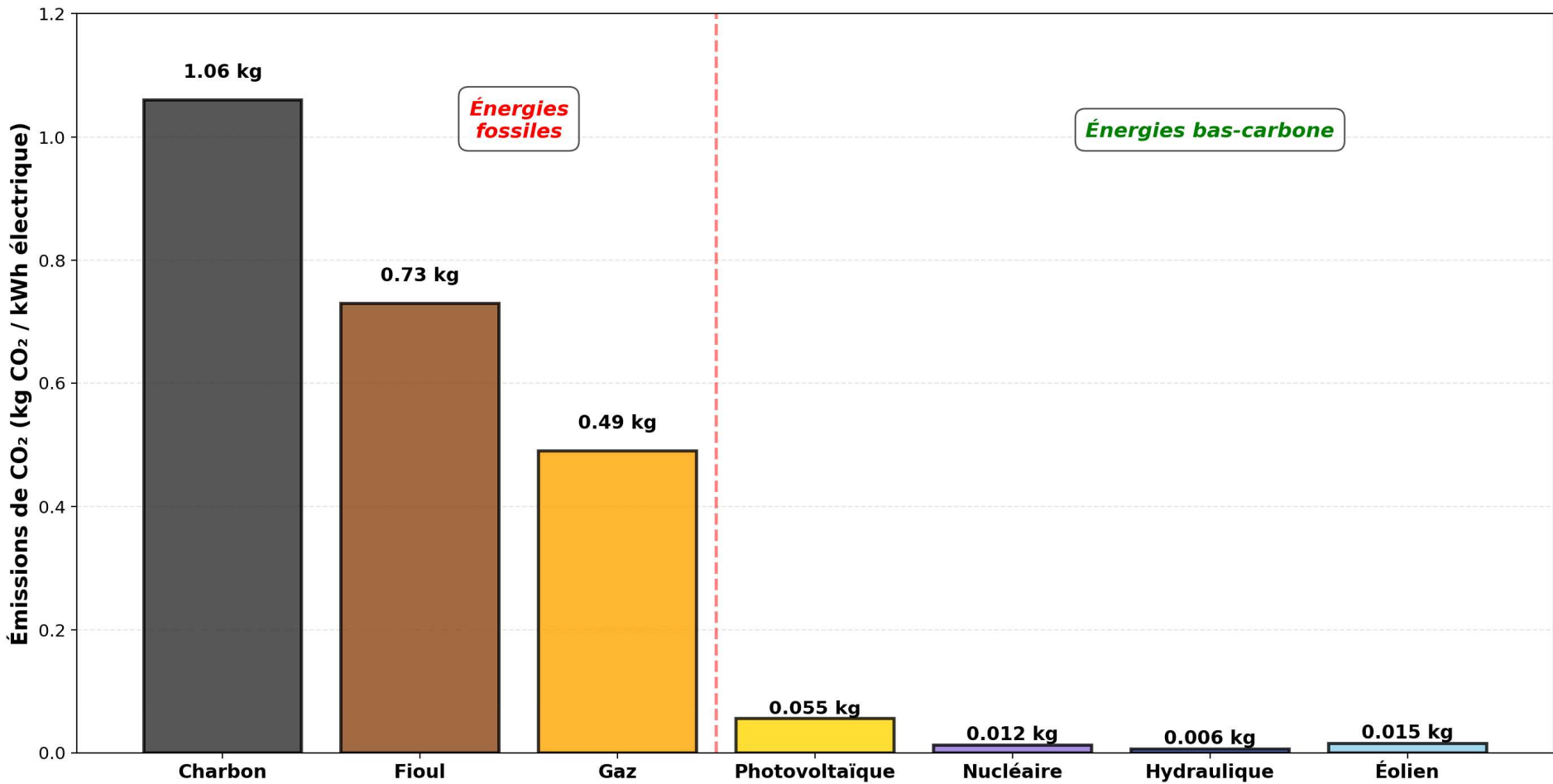
Quelle energie minimum pour extraire le CO₂ ?



Thermodynamic Minimum Energy for CO₂ Separation from Air
T = 25°C



Émissions de CO₂ par source de production électrique (Analyse du cycle de vie complet)



Note: Les valeurs incluent l'ensemble du cycle de vie (extraction, construction, exploitation, démantèlement).
Sources: GIEC, ADEME, Base Carbone

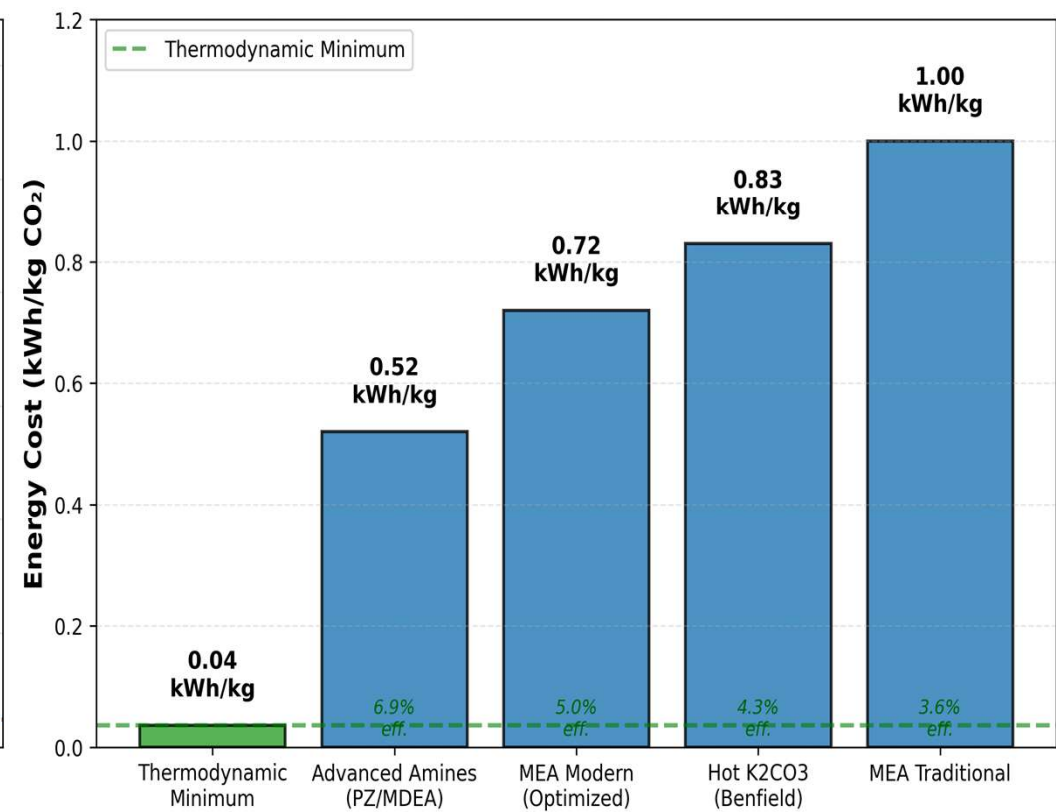
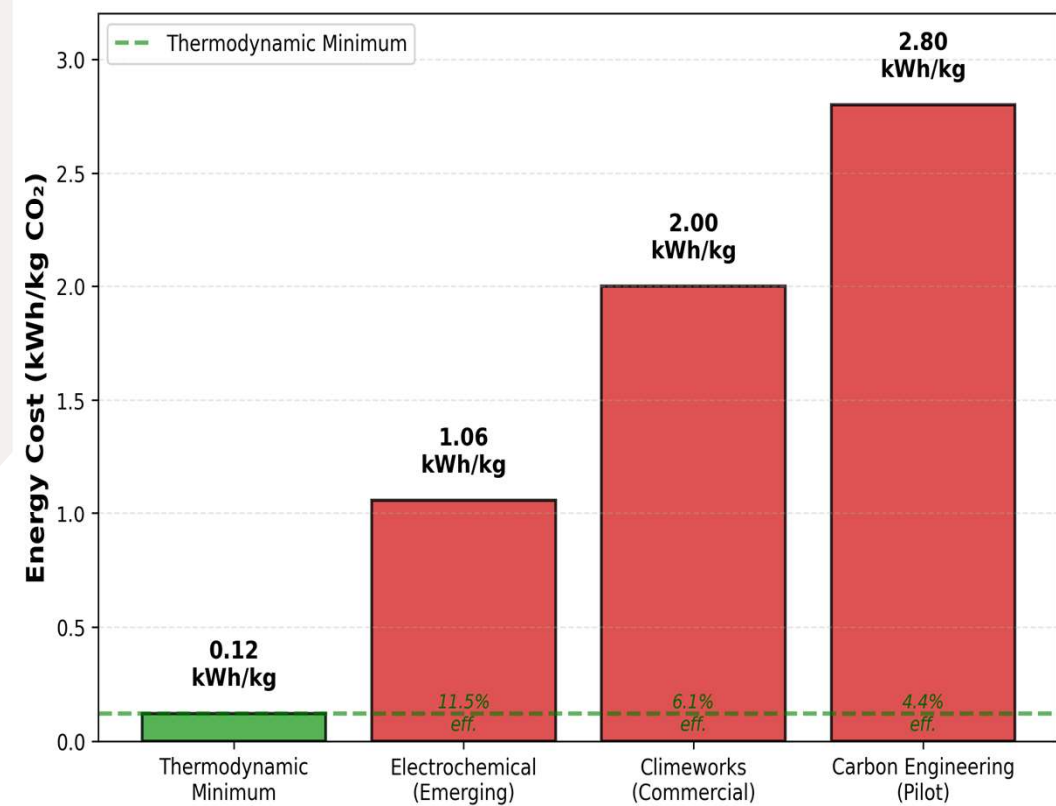


Comparaison : DAC et Source ponctuelle



**Direct Air Capture (DAC)
CO₂ at 400 ppm**

**Point Source Capture
CO₂ at 10-15%**



Capture directe dans l'air et Capture sur un point d'émission



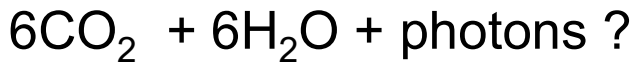
	Unit	CO2 concentration	In ppm
Environnement extérieure	(g/Nm3)	0.8	450
Bâtiment bien ventilé et peu occupé	(g/Nm3)	1.5	800
Bâtiment ventilé et bien occupé	(g/Nm3)	1.9	1000
Bâtiment mal ventilé et bien occupé	(g/Nm3)	3.8	2000
Bâtiment non ventilé et bien occupé	(g/Nm3)	4.8	2500
Gas de combustion	(g/Nm3)	193	100 000

1 ppm = un volume / 1 million de volume

Quel dépendance minimum au réseau, si on fait du stockage saisonnier ?

Les composantes énergétiques d'un bâtiment

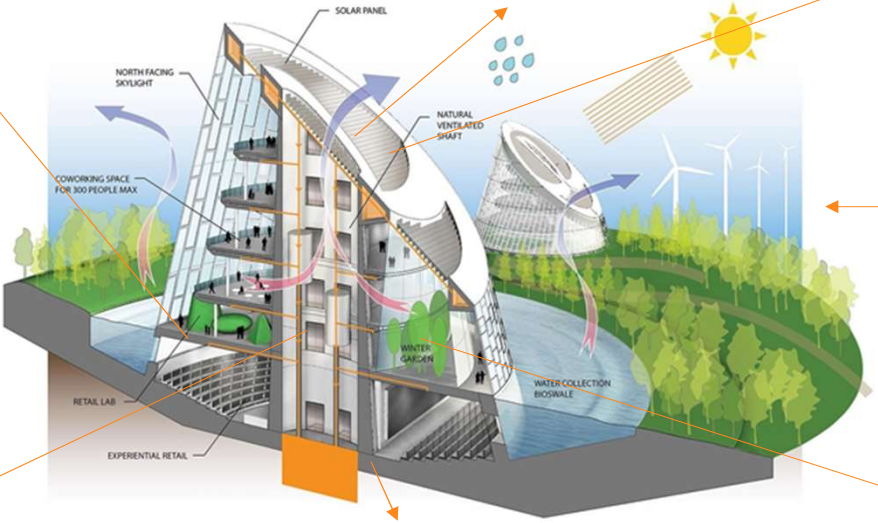
(Exemple : 4 000 m², 10 000 m³)



Eau (pluie)
 (4000m² @800l/a.m²)
3 200 000 l/ an

Production PV
 800 Kwp (3200 m²)
800 Mwh/ an

Ventilation
 10 000 m³/h (10h/jour)
10.4 Mwh/ an



Réseau électrique

Besoin en froid
 15 Kwh/ a.m²
60 Mwh/ an

Autre besoin électrique
 20 Kwh/ a.m²
80 Mwh/ an

Besoin en chaud
 25KWh/a.m2
100 Mwh/ an

7 HECTARES DE FORÊTS

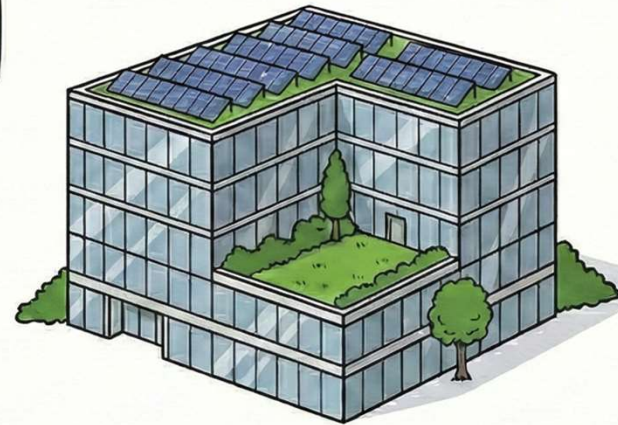


CAPTURE:
35 TONNES DE CO₂/AN

ÉQUIVALENCE DE
CAPTURE DE CO₂

=

BÂTIMENT 4000 m²
(TECH. DE CAPTURE)



CAPTURE:
35 TONNES DE CO₂/AN

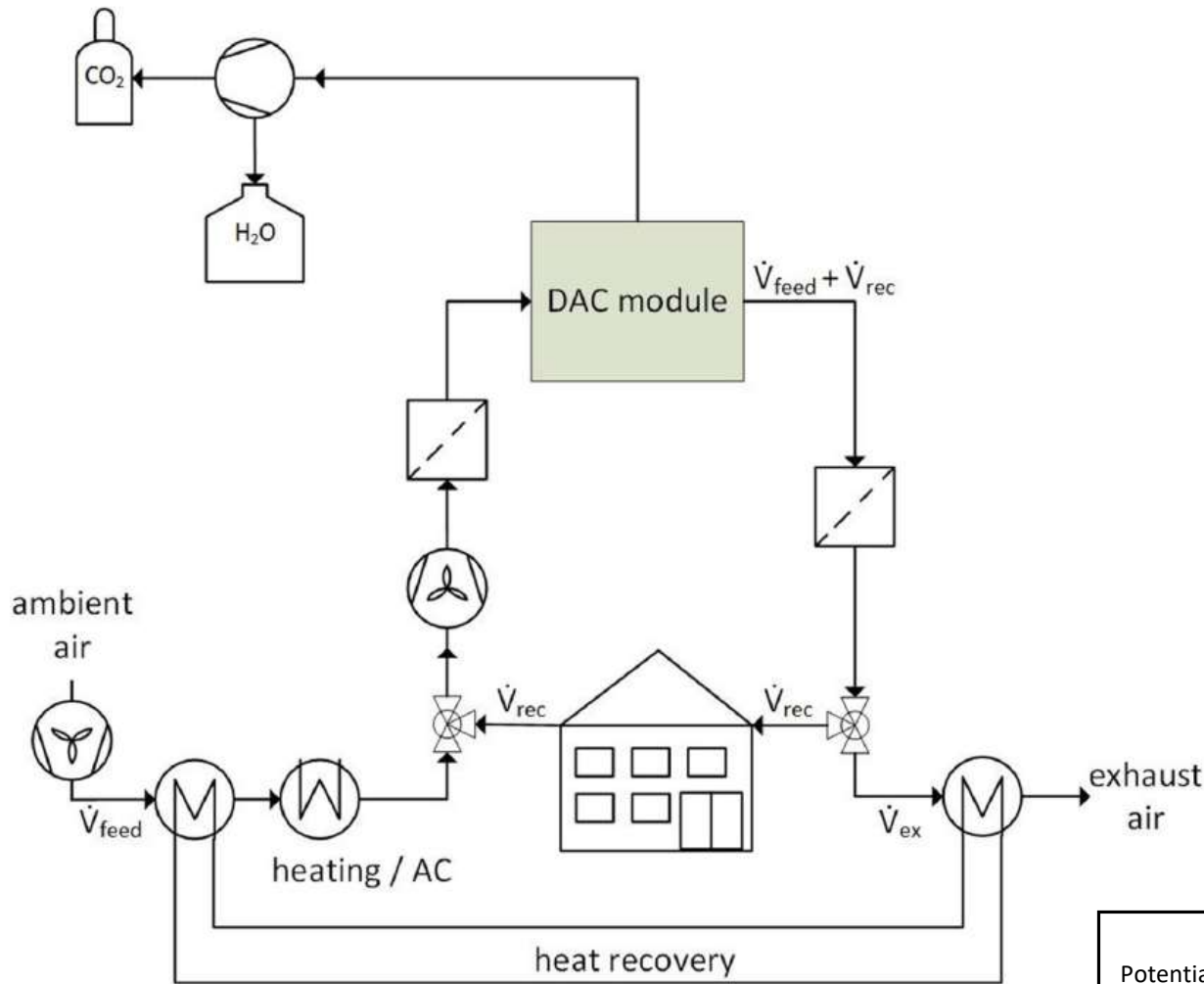


Fig. 1. Concept layout for a HVAC/DAC-coupling in recirculation mode.

Potentials and limitations of direct air capturing in the built environment
 Lukas Baus, Sascha Nehr *
 European University of Applied Sciences, Kaiserstraße 6, 50321, Brühl, Germany

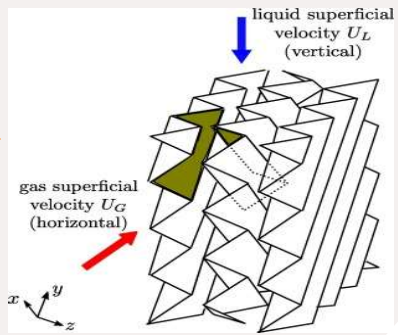
La qualité de l'air intérieur

La qualité de l'air intérieur



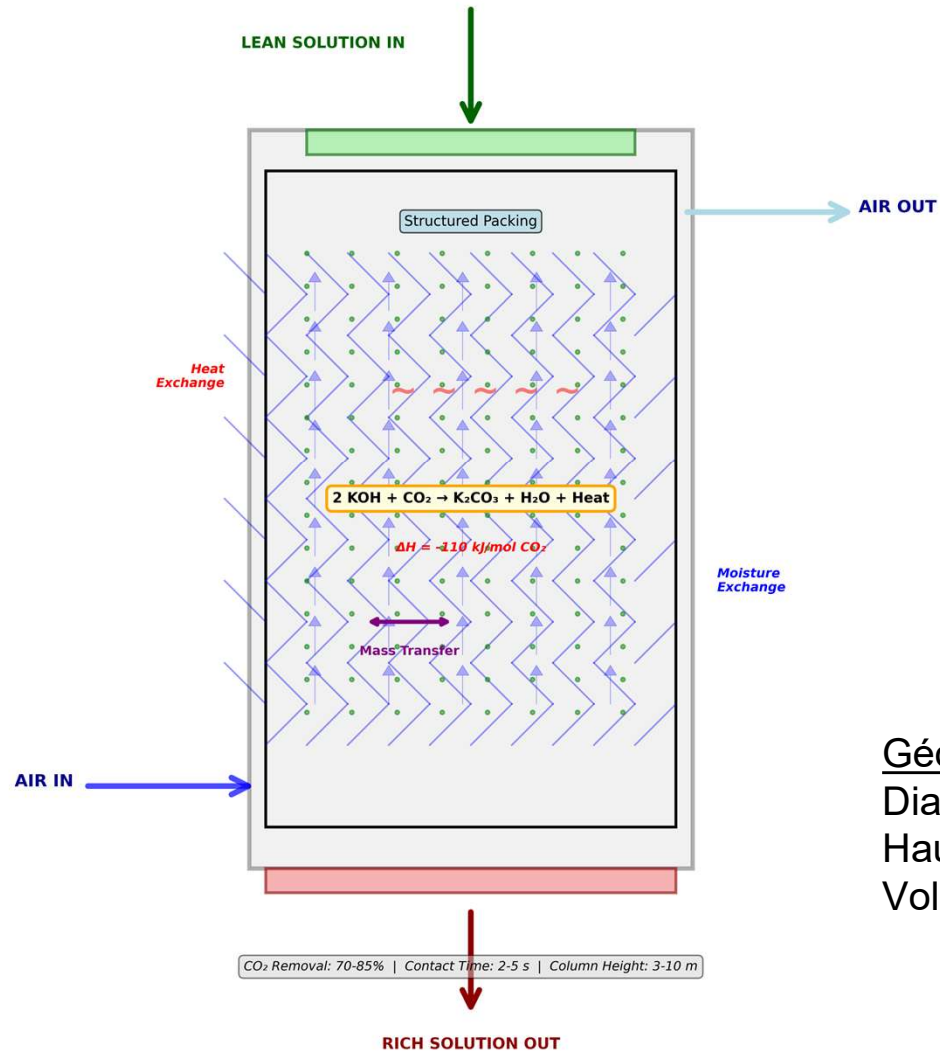
La qualité de l'air intérieur





Hydroxide-Based DAC Reactor

Counter-Current Packed Bed Absorber

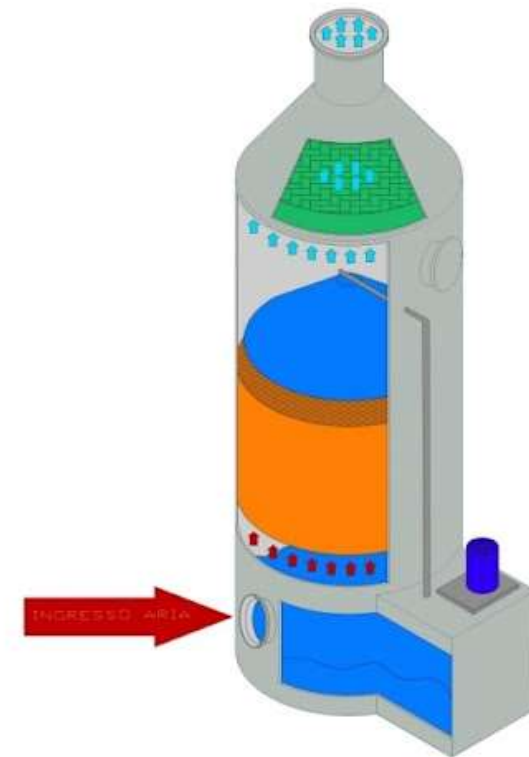


Géométrie :

Diamètre : 2.24 m

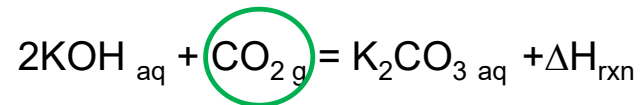
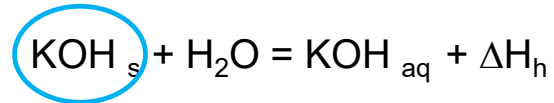
Hauteur : 2.0 m

Volume : 10.0 m³

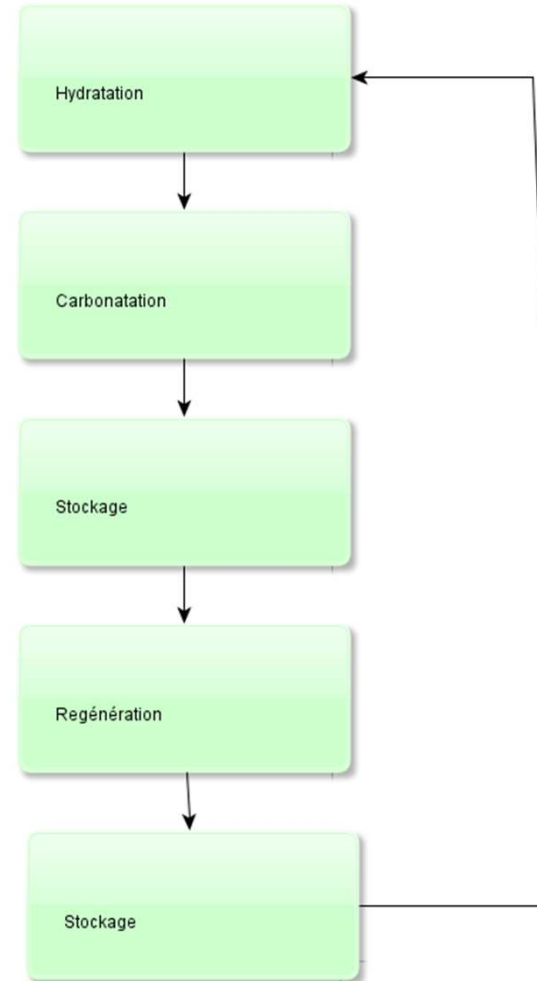
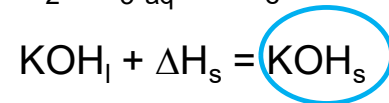
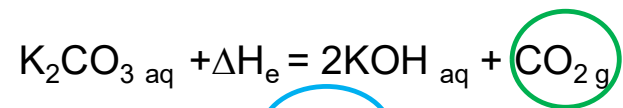


Le cycle de capture du CO₂

Hiver

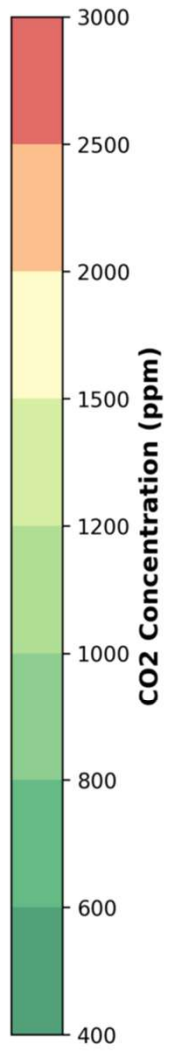
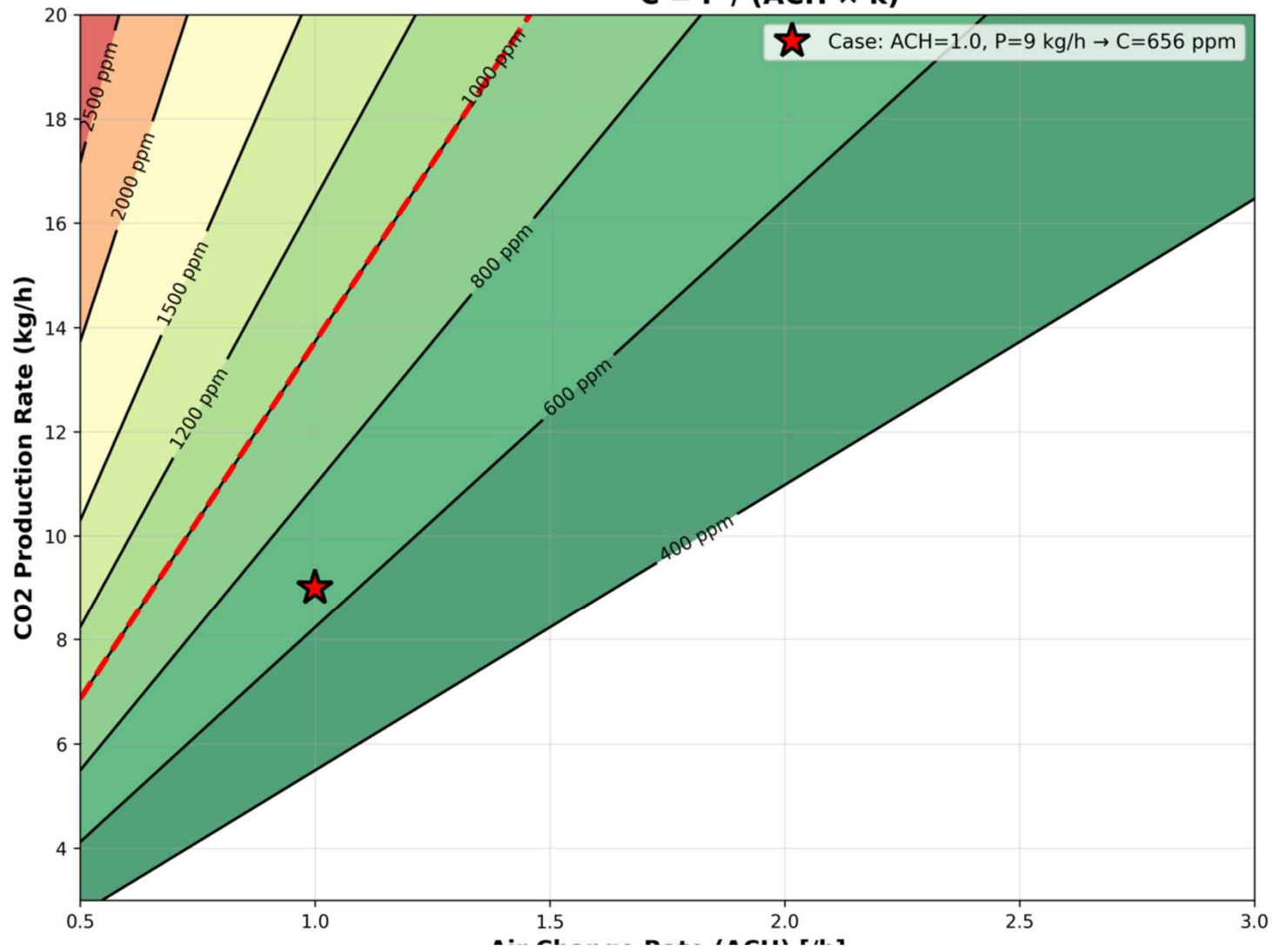


Eté



CO2 Concentration - Scrubber System (k=75%)

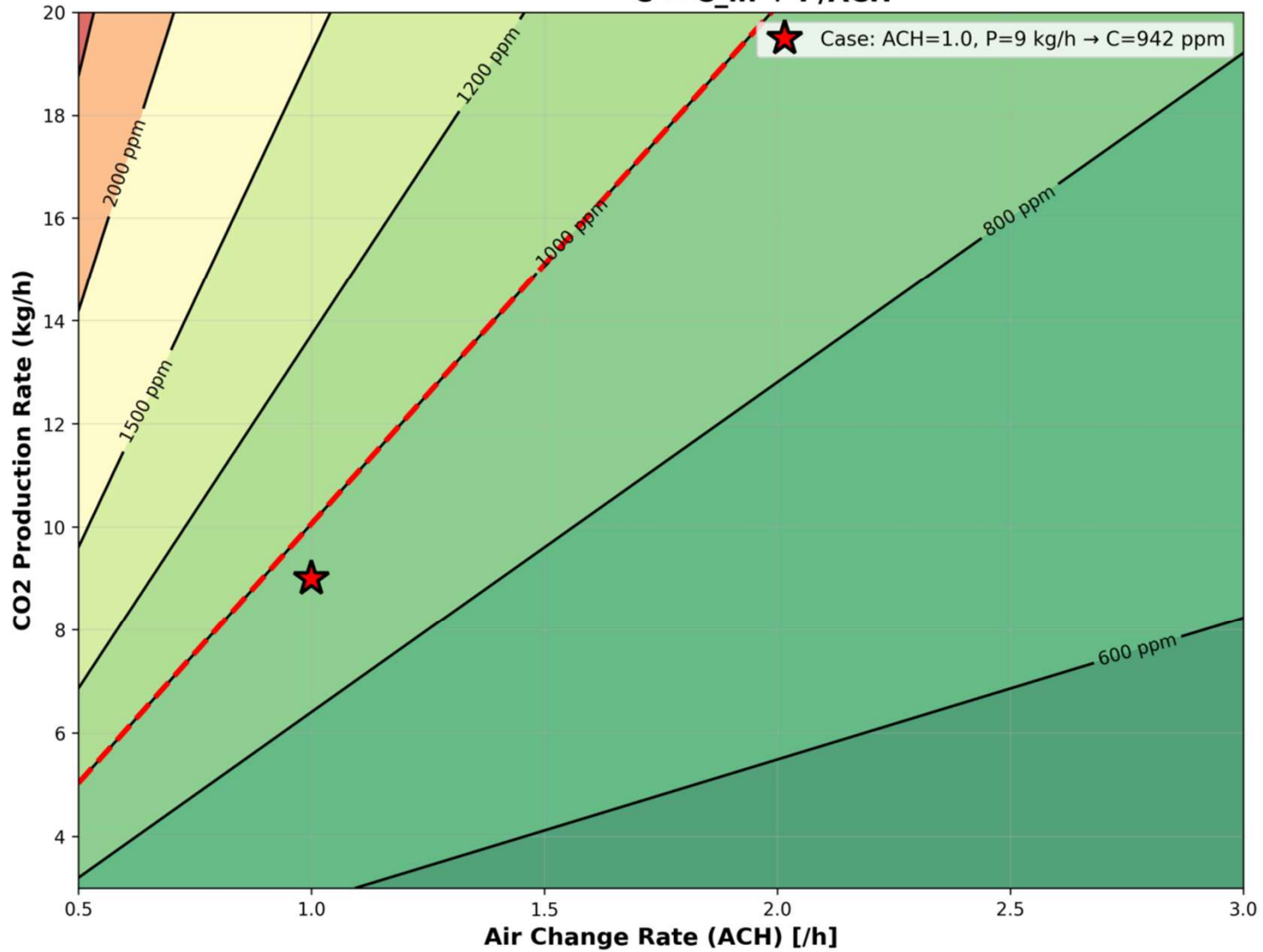
$C = P / (ACH \times k)$



V=10000 m³

CO2 Concentration - Fresh Air System (C_{in}=450 ppm)

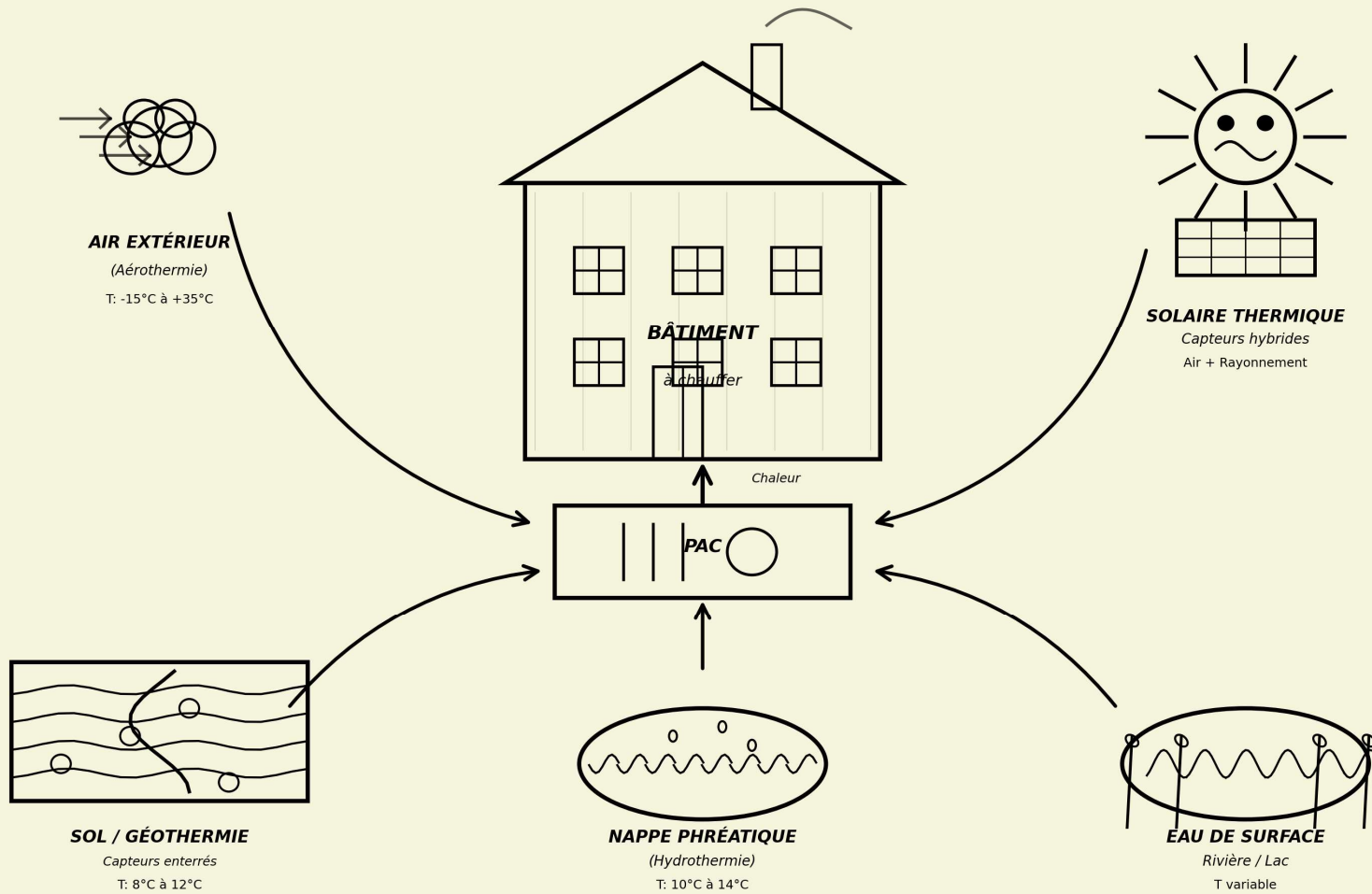
$$C = C_{in} + P/ACH$$



V=10000 m³

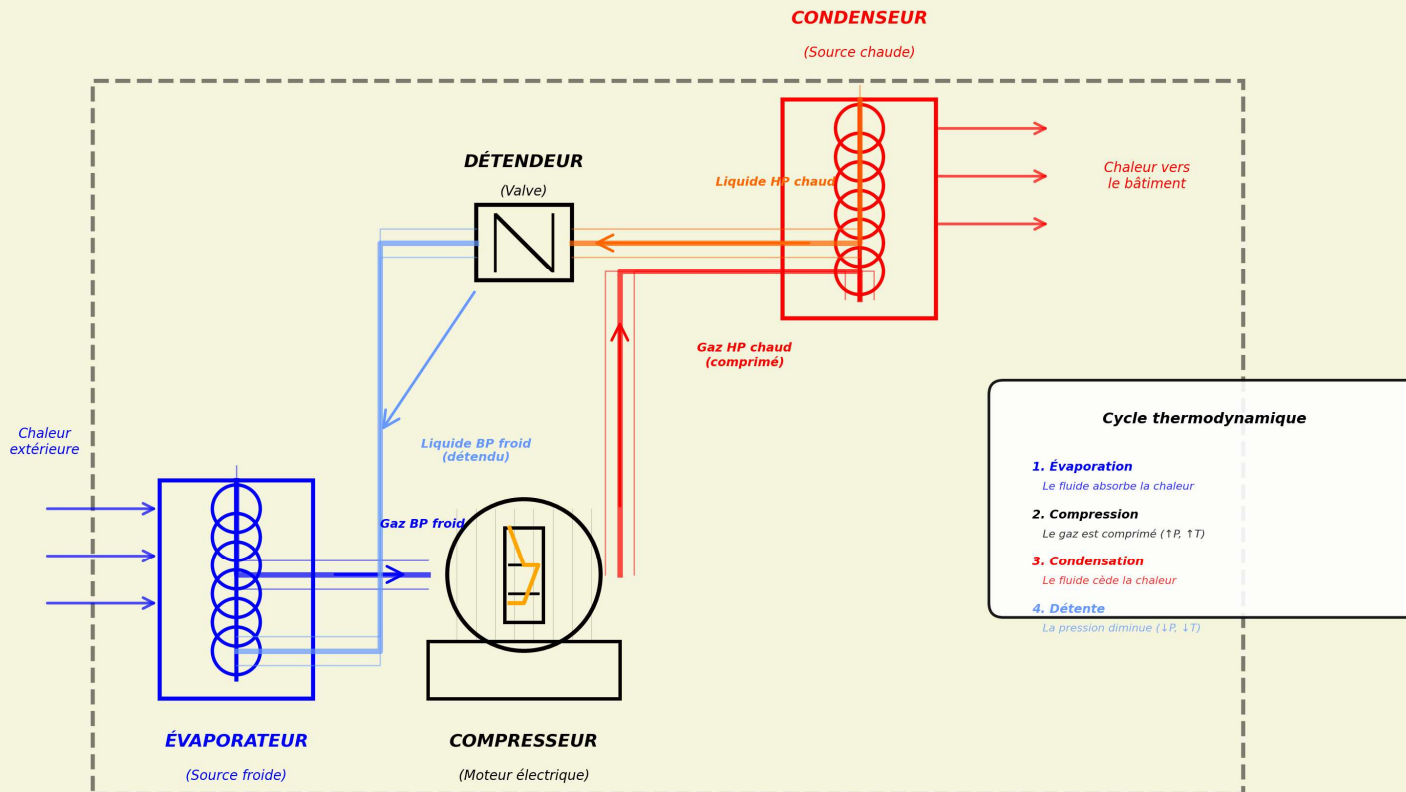
La climatisation : chauffage et refroidissement

Sources de chaleur pour pompes à chaleur



Fonctionnement d'une pompe à chaleur

(Principe du cycle frigorifique inversé)



Le Coefficient de Performance (COP)



$$COP = \frac{\textit{Puissance produite}}{\textit{Puissance consommée}}$$

$$\text{Exemple : } COP = \frac{60 \text{ kWh}}{15 \text{ kW}_e} = 4 \quad (\text{apport} = 45 \text{ kW}_h)$$

Le Coefficient de Performance (COP)



$$COP_{Carnot} = \frac{T_c}{T_c - T_e}$$

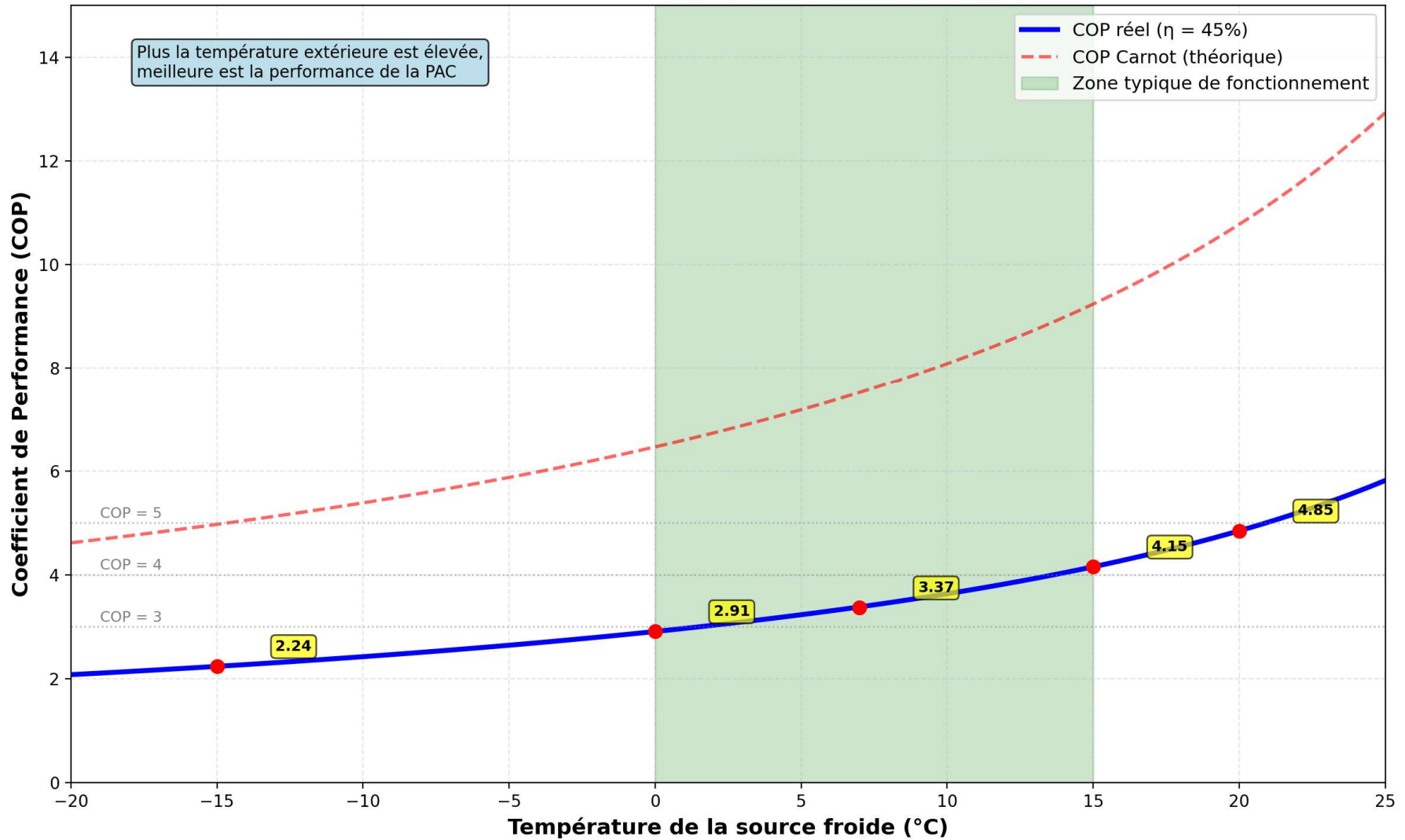
Exemple :

$$COP_{Carnot} = \frac{328 \text{ K}}{(328 - 288) \text{ K}} = 8.2$$

55° 15°

$$COP_{R\acute{e}el} = 0.5 \times 8.2 = 4.1$$

COP d'une pompe à chaleur en fonction de la température extérieure Source chaude: 50°C | Rendement: 45% du COP Carnot



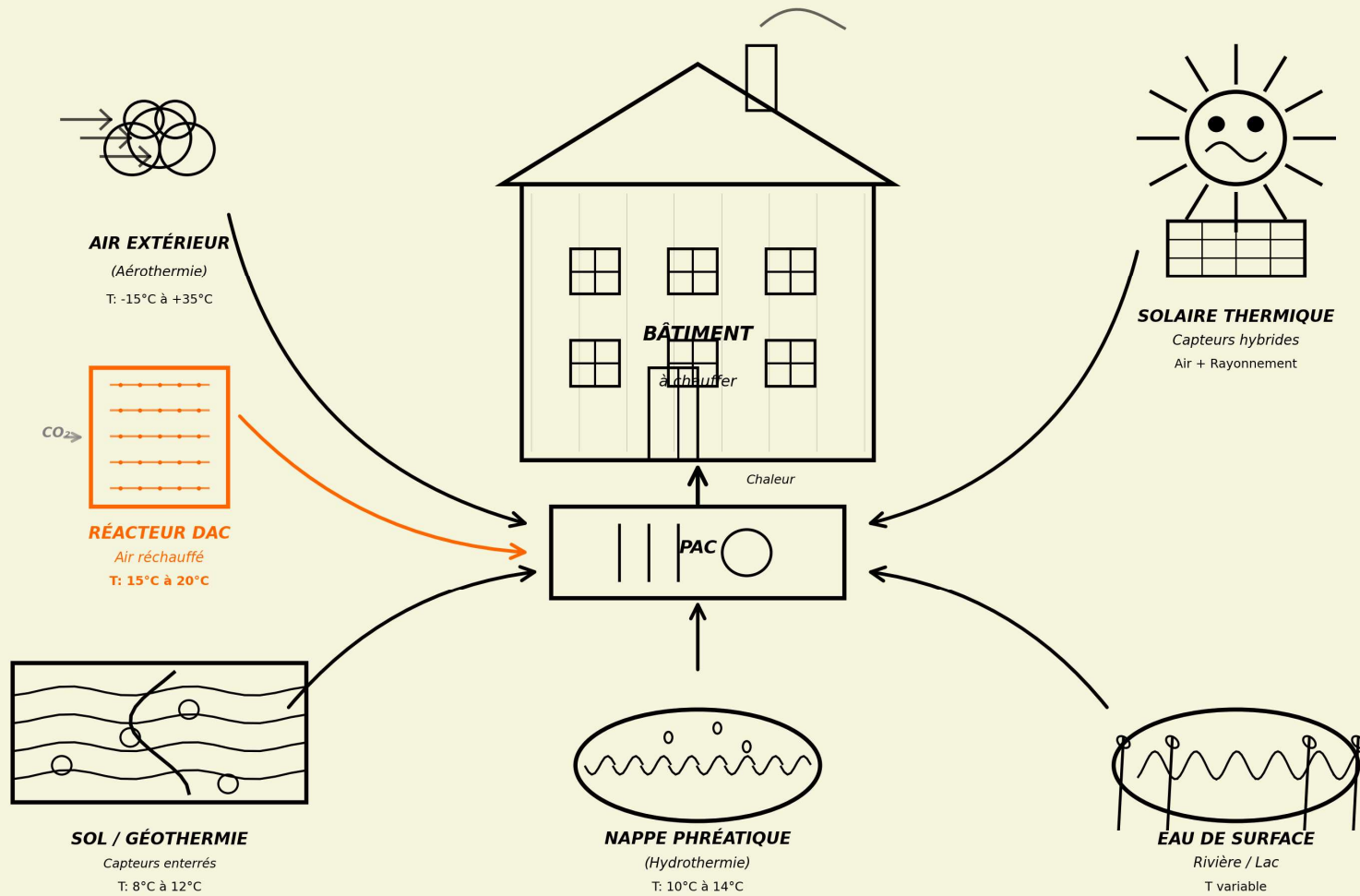
En résumé....



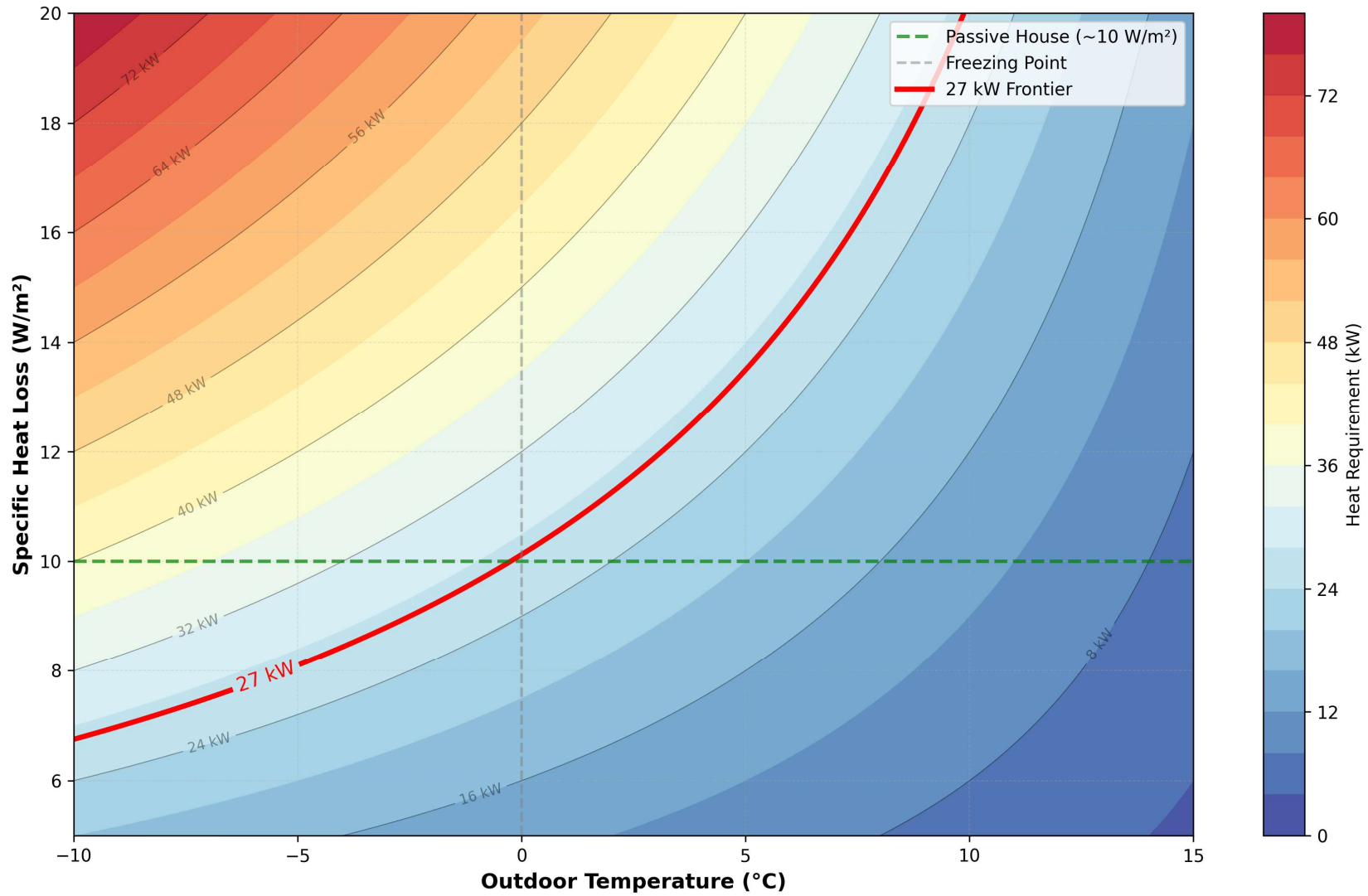
▶ La performance d'une PAC dépend de :

- La qualité de sa source de chaleur (quantité et température)
- La différence de température entre sa source chaude et sa source froide

Sources de chaleur pour pompes à chaleur

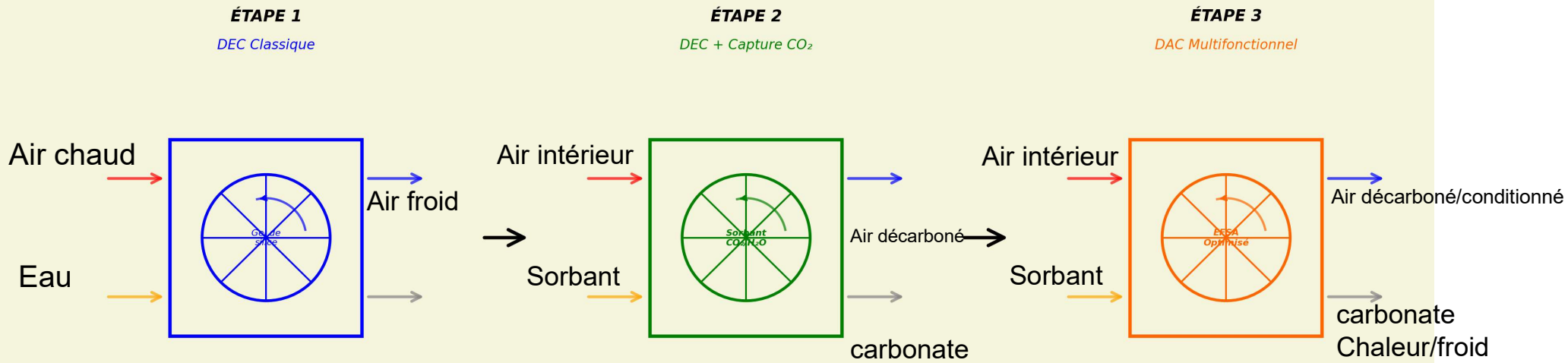


Building Heat Requirements (Floor Area: 4000 m², Indoor: 20°C, Peak ratings at -10°C)



Du DEC au DAC multifonctionnel

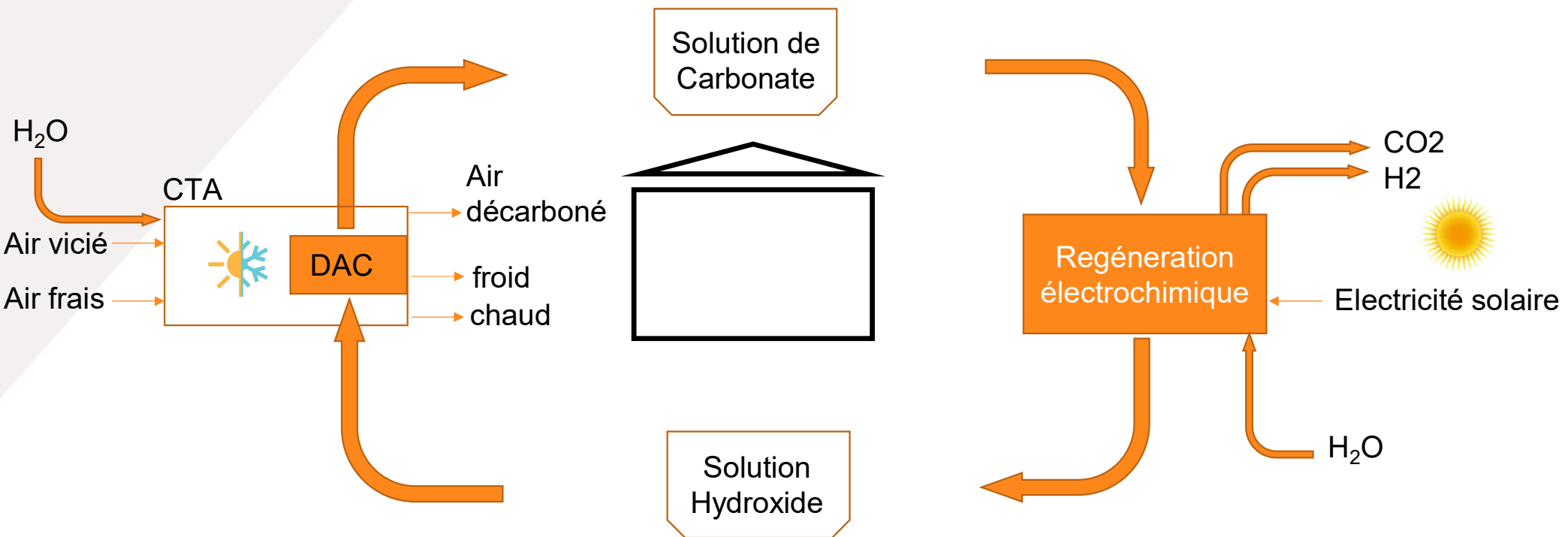
Évolution du concept de refroidissement évaporatif vers la capture de CO₂

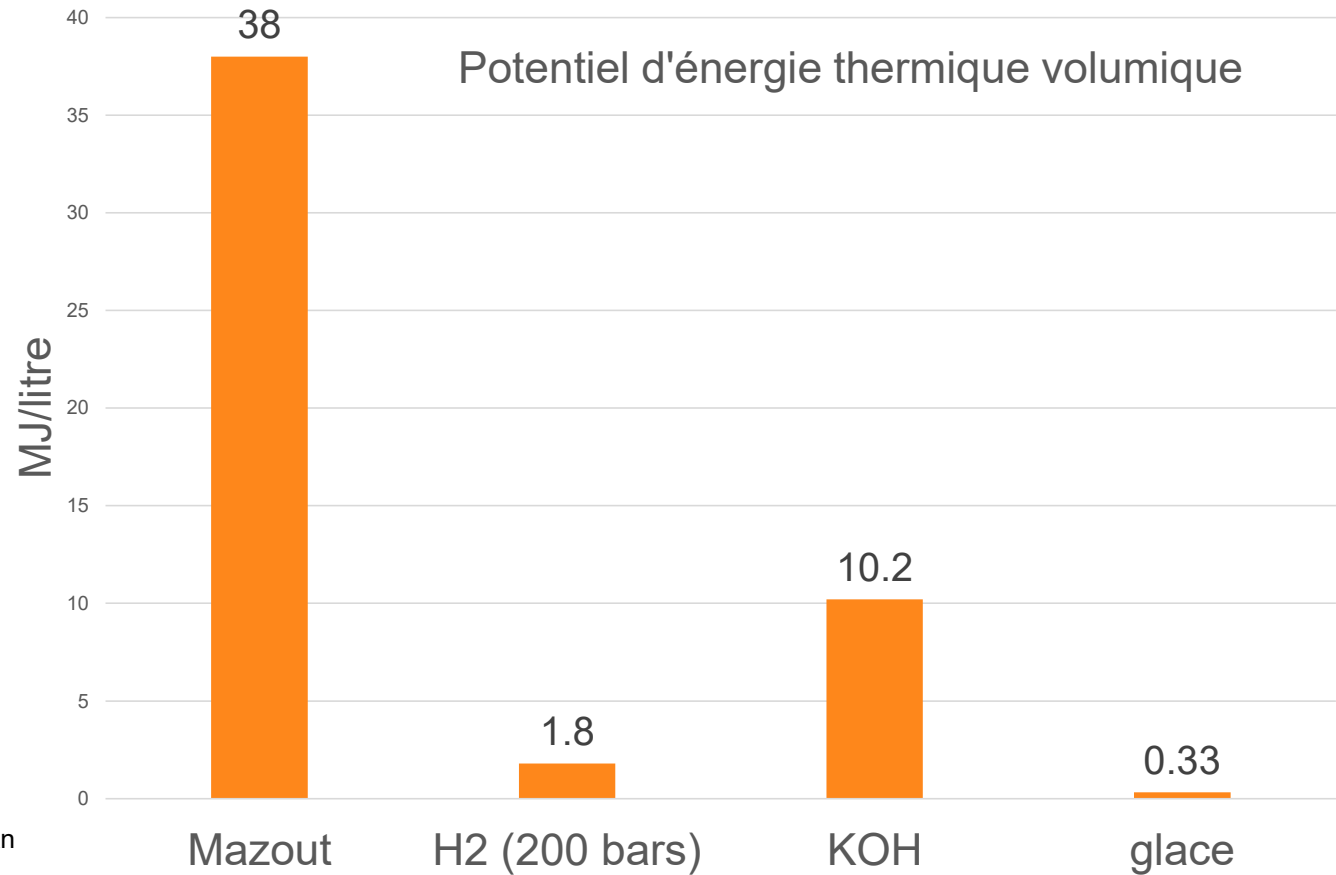


Refroidissement	😊	😊	😊
Capture CO ₂	X	😊	😊
Conditionnement	X	X	😊
Chauffage	X	X	😊

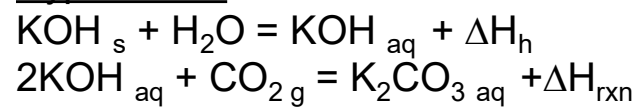
Concept circulaire de gestion de l'énergie

Concept circulaire de gestion de l'énergie





Hypothèse :



Bilan de masse



Item	Masse (T)
KOH (solide)	89.25
CO2 (Capturé)	35
K2CO3 (solution)	220
H2O	14.34

Hypothèses:

- 1) Les calculs supposent une conversion stœchiométrique à 100 %

Les avantages

- ▶ Synergies possibles
 - ▶ Qualité de l'air
 - ▶ Chauffage
 - ▶ Refroidissement
- ▶ Stockage saisonnier
 - ▶ Régénération l'été
- ▶ Valorisation possible
 - ▶ Carbonate, CO₂, Hydrocarbures
- ▶ Fonctionnement PAC optimisé
 - ▶ Haut rendement (COP)
- ▶ Bilan carbone (SEG)
- ▶ Bilan financier ?

Les challenges

- ▶ Logistique
 - ▶ KOH, Carbonate
- ▶ Coût investissement
- ▶ La réglementation
- ▶ Maintenance
- ▶ Bilan financier ?

Conclusions

- ▶ La transition énergétique est le cœur du problème actuel
- ▶ Le stockage saisonnier est indispensable aux ENR
- ▶ L'énergie pour la capture du CO₂ doit être renouvelable
 - Découplage capture et régénération du sorbant
- ▶ La capture du CO₂ est indispensable pour la production de carburant synthétique



Merci pour votre attention.

Jacques Gilbert

Promoter: Prof. Dr. Ir. Grégoire LEONARD, Prof. Dr. Ir. Vincent Lemort

Date 03/02/2026

✉ jgilbert@uliege.be

☎ +352 621 190 737