



CAELI ENERGIE
CONSCIOUS COOLING



Au-delà du cycle de Carnot, quel potentiel pour les solutions de rafraîchissement bas-carbone ?
Focus sur le rafraîchissement adiabatique à point de rosée.

Stéphane Lips – Caeli Energie
Journée CODEGEPRA - 24 Novembre 2022

Plan

Les différentes technologies de froid

Les innovations dans le domaine

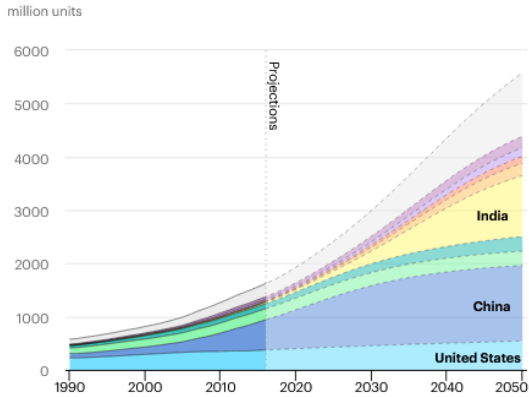
Le cas de Caeli Energie

Les différentes technologies de froid

Pourquoi parler de froid ?

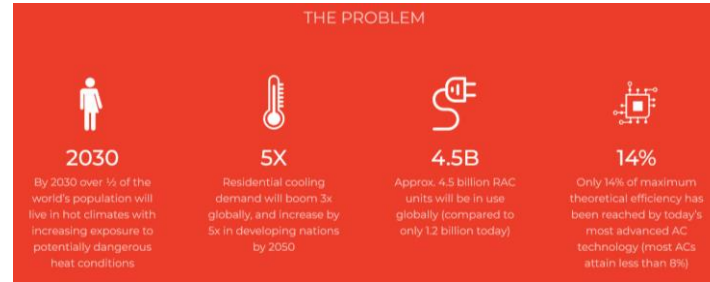
➤ Dans le secteur du bâtiment

Global air conditioner stock, 1990-2050



● United States ● China ● Japan and Korea ● European Union ● India ● Indonesia
● Mexico ● Brazil ● Middle East ● Rest of world
IEA. License: CC BY 4.0

- 20 % de la consommation énergétique actuelle des bâtiments
- D'ici 2030 : 50 % de la population mondiale vivra dans un pays « chaud »
- Un besoin de froid multiplié par 3 d'ici 2050
- Aujourd'hui : une efficacité moyenne de 14% par rapport au potentiel



<https://globalcoolingprize.org>

➤ Dans l'industrie : 90 % de l'énergie thermique transite au moins une fois dans un échangeurs de chaleur

➤ Le transport : 10 à 15% de réduction d'autonomie pour les voitures électriques

→ Indispensable dans de nombreuses applications

→ 7% des émissions mondiales de GES

→ Un besoin vital pour l'humanité

Les différentes technologies de froid

Du froid naturel au froid artificiel : les grandes étapes

Antiquité :
Le froid naturel

- Air / Eau / Evaporation
- Rayonnement
- Glace

Du XVIIème au XIXème siècle
De la théorie du froid artificiel à la pratique
du froid industriel

- 1750 : Les premiers prototypes
- 1834-1870 : Cycle à compression de Vapeur / à absorption / à air
- 1834 Découverte de l'effet Peltier

1900 – 1930 : Le froid artificiel, avec des
fluides naturels.
Les grandes inventions commerciales

- 1902 : Invention du climatiseur (Willis Carrier)
- 1911 : Premier réfrigérateur domestique (General Electric)
- 1923 : Réfrigérateur à absorption (AB Arctic – ElectroLux)

XXème – 1930-1990
L'essor des fluides frigorigènes et du froid
domestique

- 1930 : Invention des « Fréons
- 1933 : Utilisation de l'effet Magnétocalorique
- Réfrigérateurs en France : 27% en 1960 → 80% en 1970

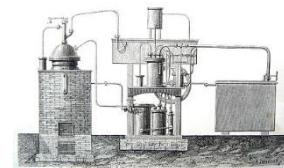
1990 - 2020
La prise de conscience et le foisonnement
technologique

- 1987/1997/2017 : Protocoles et accord de Montréal / Kyoto / Paris
- Développement des solutions utilisant les effets caloriques
- Retour des solutions des fluides naturels et de froid naturel



Exemple de
bādگیر iranien

Machine à glace de
Ferdinand Carré (1862)



Les fluides naturels :
NH₃, CO₂, H₂O, SO₂, CH₃Cl, C₂H₅Cl...

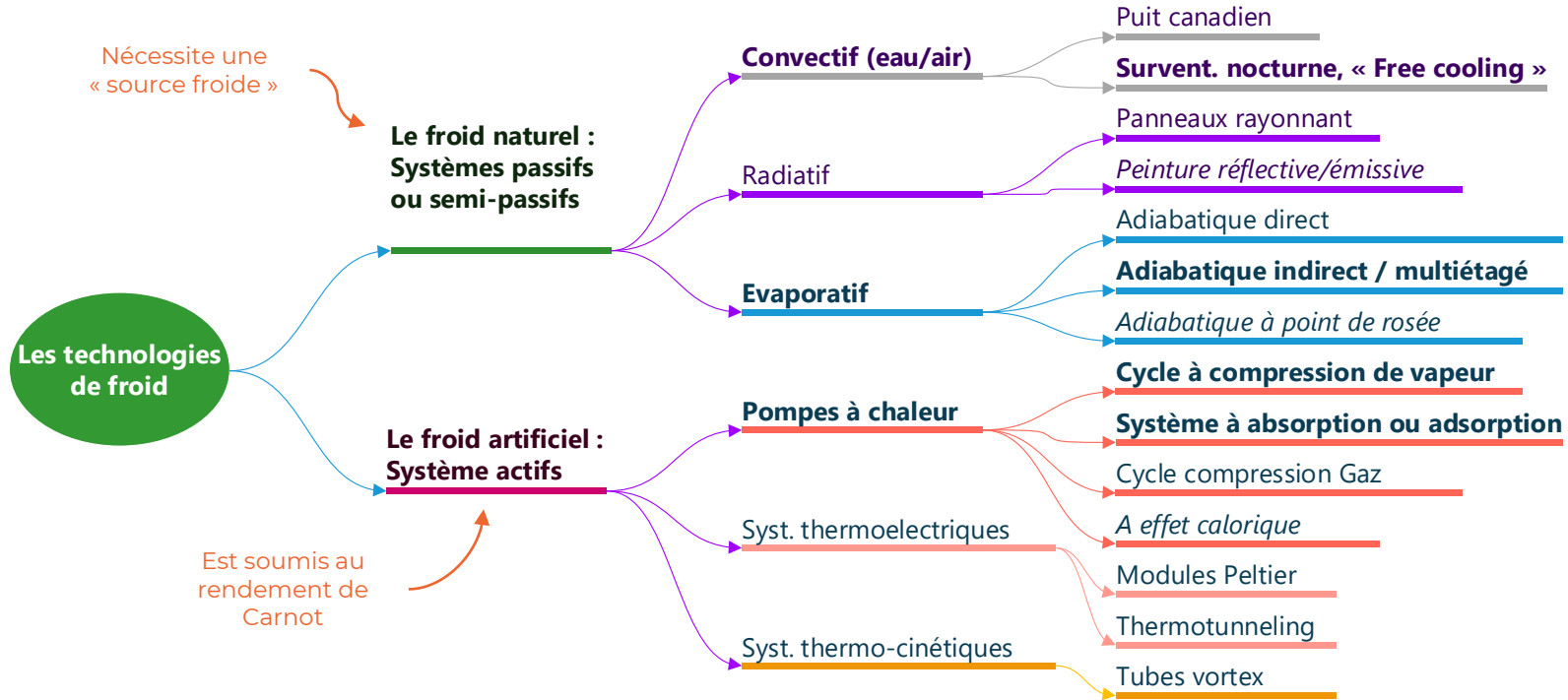
L'essor du Froid
domestique



La régulation et la recherche de solutions

Les différentes technologies de froid

Une classification des technologies de froid



→ Une multitude de technologies, pour des applications et contraintes très différentes

Focus sur les pompes à chaleur à effet calorique

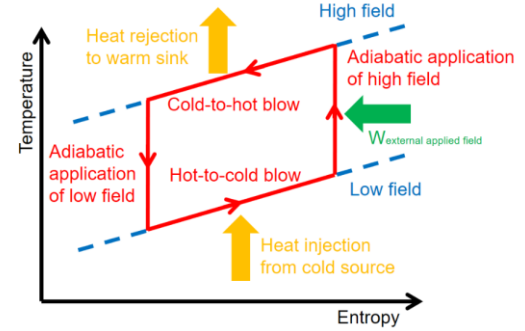
Les pompes à chaleur à effet calorique (Solid-state heat pumps)

Effet calorique : Variation de température d'un solide soumis à une variation de champs
 + Utilisation d'un cycle de Brayton ou de Carnot

4 catégories : Magnétocalorique / Electro-calorique / Thermo élastique / Barocalorique

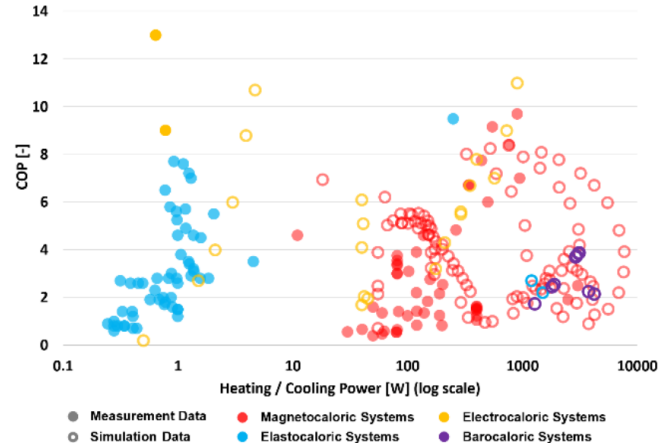
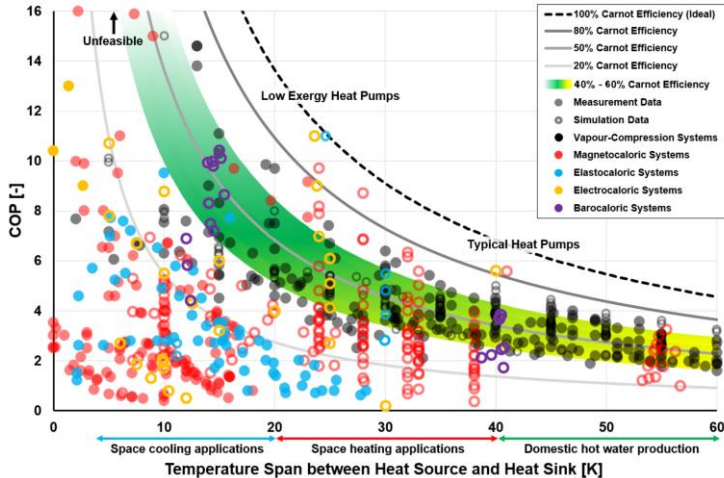
⚠ Différent des systèmes thermoélectriques

⚠ Différent des pompes à chaleur acoustiques



Performances actuelles :

◆ Mesurée / ◇ Simulées



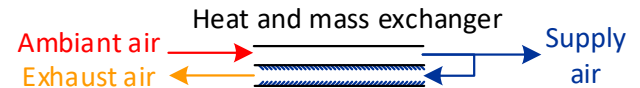
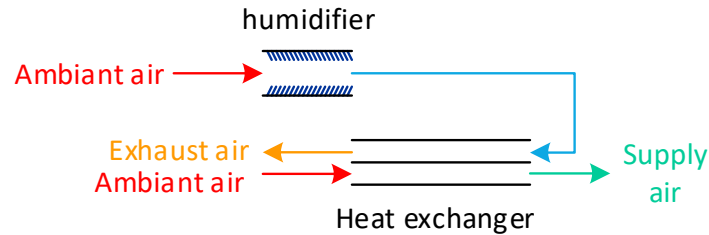
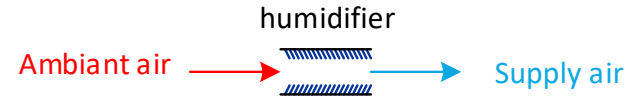
Source :
 Johra & Bahl,
 HVAC World Congress, 2022

→ Des technologies prometteuses, mais toujours limitées par le rendement de Carnot

Focus sur les système évaporatifs

3 grandes catégories de systèmes

- Adiabatique direct
 - + Simple
 - Humidification de l'air soufflé
 - Limité à la température de bulbe
- Adiabatique indirect
 - + pas d'humidification de l'air
 - + possibilité de faire de l'indirect-direct
 - Encombrant
 - Limité à la température de bulbe
- Adiabatique indirect à point de Rosée
 - + pas d'humidification de l'air
 - + Soufflage à la température de rosée
 - Complexité accrue de l'évapo-échangeur
 - Aujourd'hui, encombrant



→ Des systèmes simples, semi-passifs, mais au potentiel mal exploités

L'innovation dans le domaine du froid

Un besoin évident : Répondre aux défis actuels

Des moyens d'actions :

- Réduire les besoins
- Améliorer les systèmes existants
- Faire émerger de nouvelles technologies

Des opportunités

- Pour les acteurs établis
- Pour les startups
- Pour les investisseurs

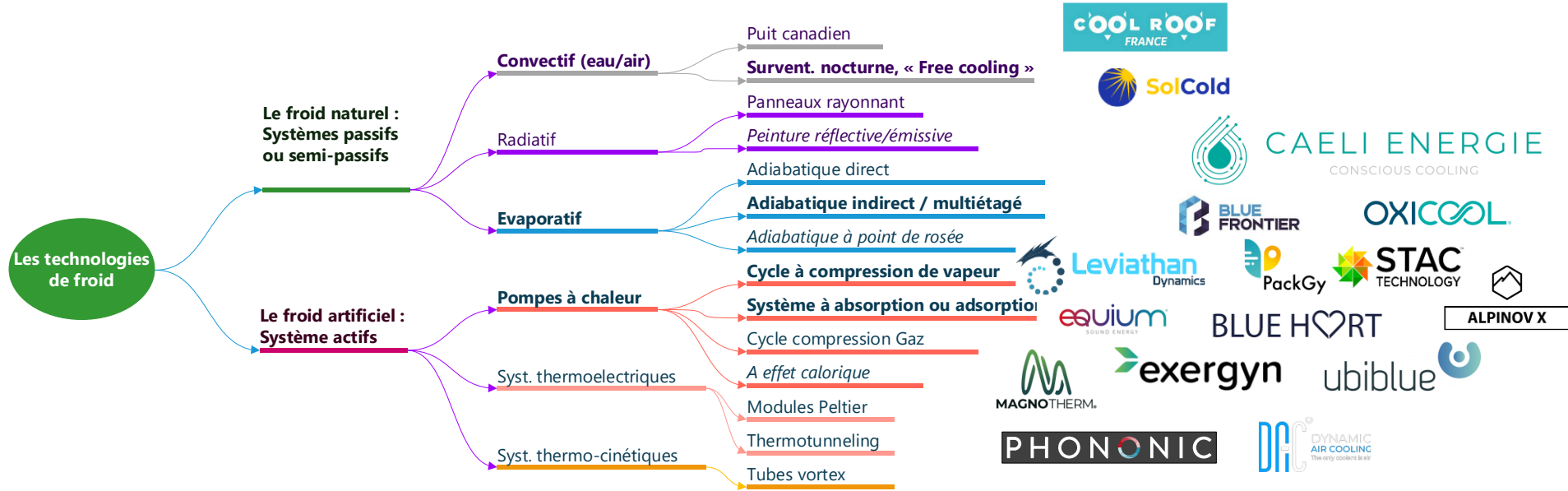
Des contraintes

- Répondre aux besoins du marché
- Être adapté à des écosystèmes complexes
- Des besoins capitalistiques important
- Des modèles économiques à trouver

→ **Des avancées scientifiques continues, qui conduisent à des ruptures technologiques régulières**

→ **Nécessité d'avoir un écosystème d'innovation complet pour faire émerger les solutions**

Exemple de l'écosystème start-up



→ Un écosystème très riche, avec des niveaux de TRL et de crédibilités très différentes
 → Attention aux arnaques !



Le cas de Caeli Energie

La mission de Caeli Energie :

concevoir et fabriquer des système de rafraichissement d'air bas carbone pour le résidentiel et le petit tertiaire



CAELI ENERGIE
CONSCIOUS COOLING



Une équipe : 13 personnes (+ 1 chien)



Notre solution : La climatisation qui n'en est pas une



Environnement

Sans fluide frigorigène
N'accroît pas les îlots de chaleur



Conso électrique

Divisée 3 à 5



Intégration

Sans bloc froid externe



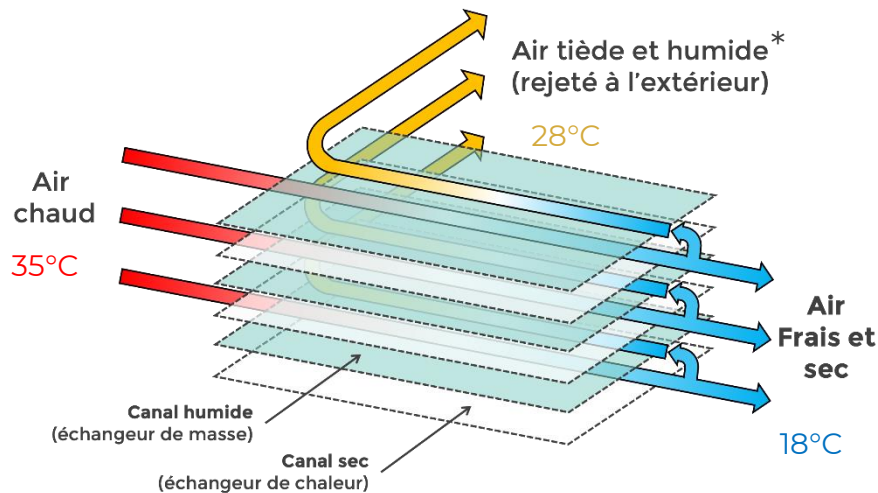
Confort

Silencieux sans compresseur

Technologie

Rafrâchisseur adiabatique indirect à point de rosée

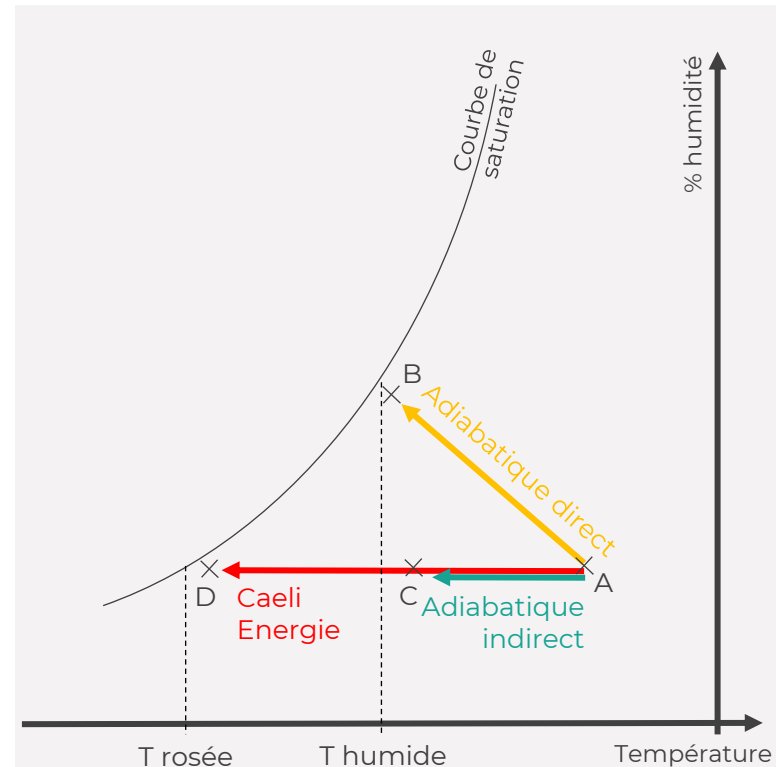
ÉCHANGEUR TYPE MAISOTSENKO: Échangeur de **chaleur & masse combinés**



Partenaires scientifiques & académiques



*L'air rejeté à l'extérieur est toujours plus frais que l'air déjà présent à l'extérieur



correspondance
psychrométrique

Differentiation from existing dew point evaporative technologies

X 4

More impact

+60%

Energetic performance

+/-

Pression neutral

+20%

Thermal Performance

3 patents



Coolerado
by SEELEY INTERNATIONAL

Climate Wizard
by SEELEY INTERNATIONAL



Large systems adapted for rooftop applications



AOLAN 澳蓝
INDUSTRY CO., LTD

Conclusions

- **Le paysage des technologies de froid se diversifie**
 - Grâce aux avancées scientifiques
 - Pour répondre à un vrai besoin
 - Mais qui engendre une complexification du paysage
- **L'écosystème pour faire émerger les solutions innovantes existe**
 - Qui regroupe tous les acteurs impliqués
 - Un besoin de moyens importants
 - Un effort sociétal remarquable
- **Des vraies avancées dans le froid résidentiel et tertiaire**
 - Qui mettront du temps à avoir un impact significatif
 - Qui diffuseront sur d'autres applications
 - Attention, aux fausses bonnes idées et à l'effet rebond !

→ **La recherche scientifique doit jouer son rôle de générateur d'innovations !**