



Université de  
Sherbrooke

# Efficacité énergétique

Un exemple de collaboration tripartite entreprise, centre de recherche et université

Dominique Monney  
MONDO360 Services Inc.

Hakim Nesreddine  
Hydro-Québec

Sébastien Poncet  
Université de Sherbrooke



1

## Agenda

- Introduction
  - ✓ Réfrigération
  - ✓ Thermopompe / Pompe à chaleur
- Projets R&D collaboratifs
  - ✓ Combler l'écart entre le milieu universitaire et les entreprises privées
  - ✓ Financement
  - ✓ Chaire de recherche CRSNG en efficacité énergétique industrielle
  - ✓ 2 exemples concrets au LTE (Laboratoire des Technologies de l'Énergie)
- Résultats scientifiques sur des cycles de réfrigération et thermopompe
  - ✓ Éjecteurs supersoniques
  - ✓ Tubes Vortex
- Conclusions et perspectives

2

1

## ► Introduction: réfrigération



- La demande énergétique pour le refroidissement dépassera l'énergie utilisée pour le chauffage d'ici 2060 (Agence néerlandaise d'évaluation environnementale): enjeux du réchauffement climatique + émergence de nouveaux besoins en réfrigération (data centers, liquéfaction de gaz...).
- La réfrigération représente environ 21 % de la consommation d'énergie du secteur industriel au Canada; 70% des économies d'énergie potentielles sont encore inexploitées.
- La réduction progressive des HFC et l'utilisation de réfrigérants à faible PRG sont largement engagées. (Exemple: la dernière révision proposée de la F-Gas européenne fixe une limite à un PRG (GWP) moyen de 50 !)

### Tendances mondiales:

- Réduction de la dépendance aux combustibles fossiles grâce à l'utilisation de la chaleur perdue ou de sources d'énergie renouvelables – Décarbonation
- Économies d'énergie: amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes existants et/ou développement de nouvelles technologies et/ou configurations efficaces.
- Introduction rapide de fluides frigorigènes alternatifs à faible pouvoir de réchauffement – Principalement fluides naturels et A2L (Air, CO2, NH3, HC, Etc..)



Unités de climatisation murales à Hong Kong.  
Photo: Andrew Aitchison

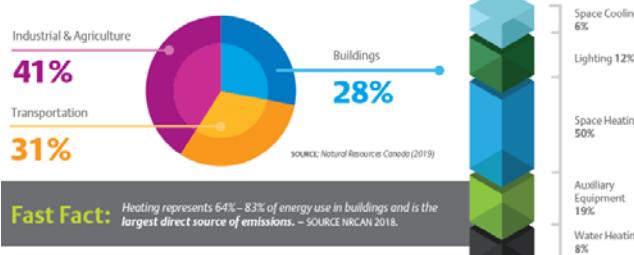
3

## ► Introduction: thermopompe

L'électrification des bâtiments est essentielle à la durabilité environnementale



### ENERGY CONSUMPTION BY SECTOR



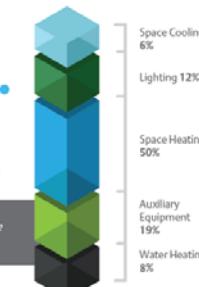
- Net zero emissions by 2050
- Heat pumps standard by 2030 in residential and commercial space and water heating

SOURCE: Treasury Board of Canada & NRCan, February 2021



- Net zero emissions by 2050
- 100% clean energy grid by 2035

SOURCE: The White House, April 2021



Il n'y pas de neutralité climatique sans décarbonisation du chauffage

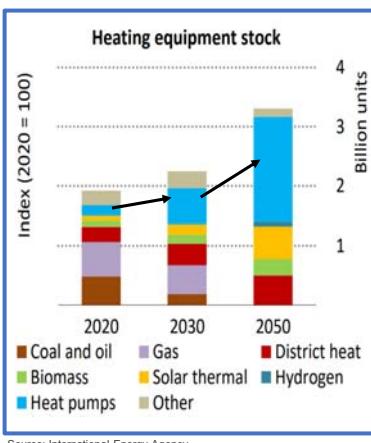
### Tendances principales:

- Électrification des secteurs d'utilisation finaux tels que le chauffage des bâtiments, les transports...
- Efficacité énergétique systémique pour réduire la demande d'énergie et fournir de la flexibilité au réseau
  - Pompes à chaleur
  - Valorisation énergétique des déchets
  - Stockage thermique
  - Flexibilité de la demande
  - Énergies renouvelables
- Faciliter la transition vers les énergies renouvelables et décarboner davantage l'électricité
- Numérisation: IoT and AI pour accroître encore l'efficacité et aider à déclencher et à mener un changement de comportement.

4

## ► Introduction: thermopompe

IEA: "50%+ de la demande de chauffage mondiale sera accomplie par des PAC en 2045"  
L'inventaire des pompes à chaleur installées passera de 180 millions d'unités en 2020 à 600 millions d'unités en 2030!



Source: International Energy Agency

### AVANTAGES DE LA TECHNOLOGIE DE LA POMPE À CHALEUR

#### Propriétaires bâti. / utilisateurs finaux

- Efficacité énergétique et atténuation de la demande de pointe
- Retour sur investissement et coût de possession tout au long du cycle de vie
- Réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES)

#### Utilités

- Optimisation du réseau électrique
- Consommation d'énergie découpée
- Flexibilité du réseau et gestion de l'offre et de la demande

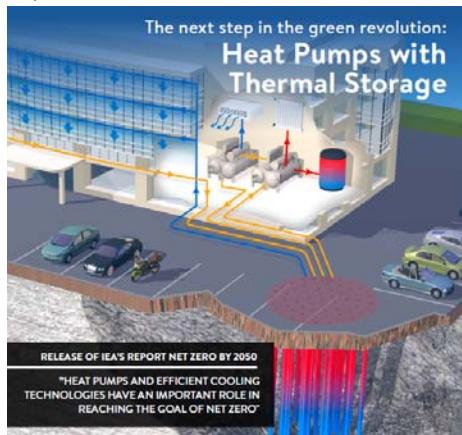
**Les pompes à chaleur sont essentielles à la décarbonisation**

5

## ► Introduction: thermopompe

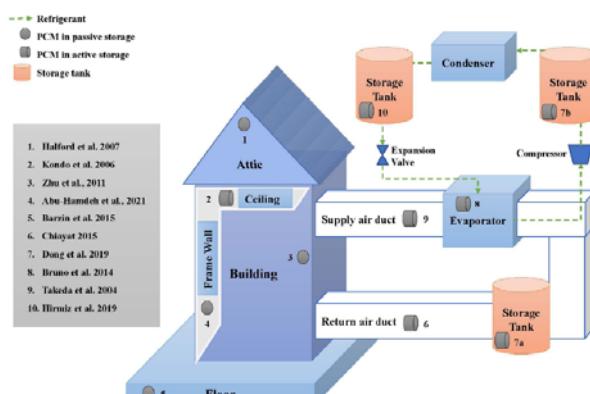
Stockage d'énergie thermique intégré à la PAC pour le "Demand Response"

Découpler la charge de la PAC est essentiel pour un bâtiment interactif avec le réseau



Sources: International Energy Agency

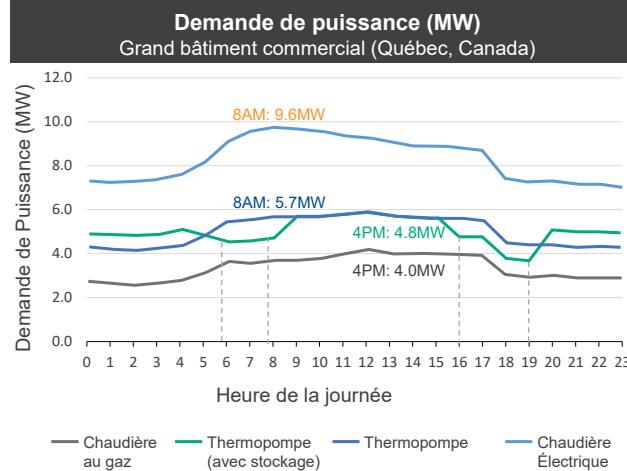
Dix configurations possibles pour intégrer du stockage d'énergie thermique avec une pompe à chaleur



6

## ► Introduction: thermopompe

Les utilités s'intéressent à la technologie des PAC pour réduire l'impact de l'électrification du chauffage des locaux sur la demande d'électricité



### Gestion de la demande de pointe

- La combinaison de la PAC avec le stockage de chaleur réduira la demande d'électricité pendant les heures de pointe.
- Les chaudières électriques peuvent augmenter les charges de pointe de **-140%**.
- Le stockage de chaleur aide à effectuer la gestion de la demande et permet à la pompe à chaleur de fonctionner à son point de fonctionnement le plus optimal (efficace).
- L'utilisation d'une pompe à chaleur augmente la demande de puissance d'un pourcentage qui est gérable et reste beaucoup moins élevée qu'une chaudière électrique.

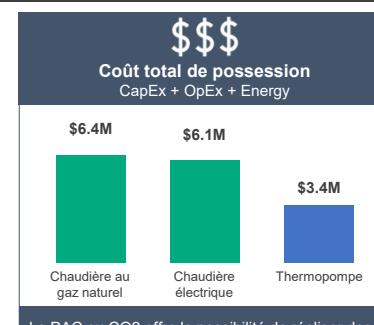
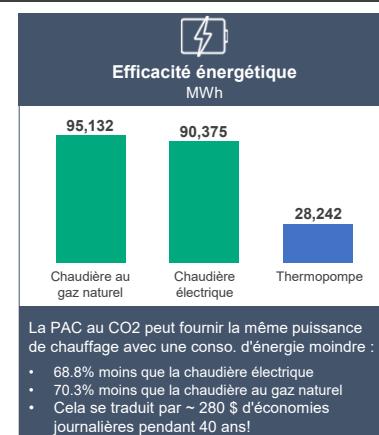
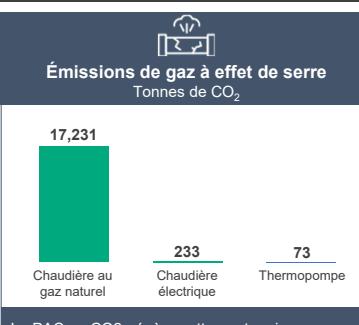
7

Les pompes à chaleur offrent une durabilité environnementale et des avantages financiers importants

### Comparaison de la technologie d'une PAC au CO2 versus des chaudières (Puissance thermique: 1.3 MW ) Montréal, Québec, Canada

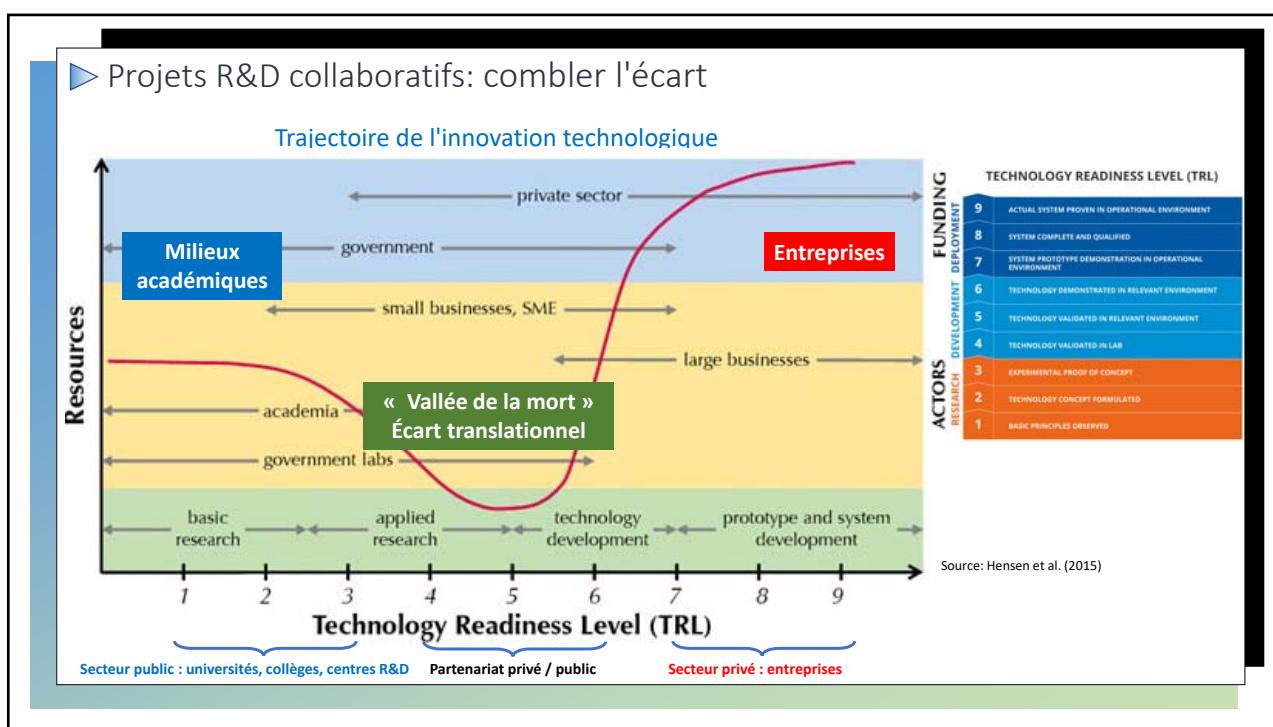
#### Données prises en considération

Coût énergie électrique :	par kWh	\$ 0.035
Cout demande électrique :	par kW	\$ 13.430
Émissions CO2 de l'électricité :	kg / kWh	0.003
Coût du gaz naturel :	par kWh	\$ 0.028
Émissions de CO2 du GN:	kg / kWh	0.181

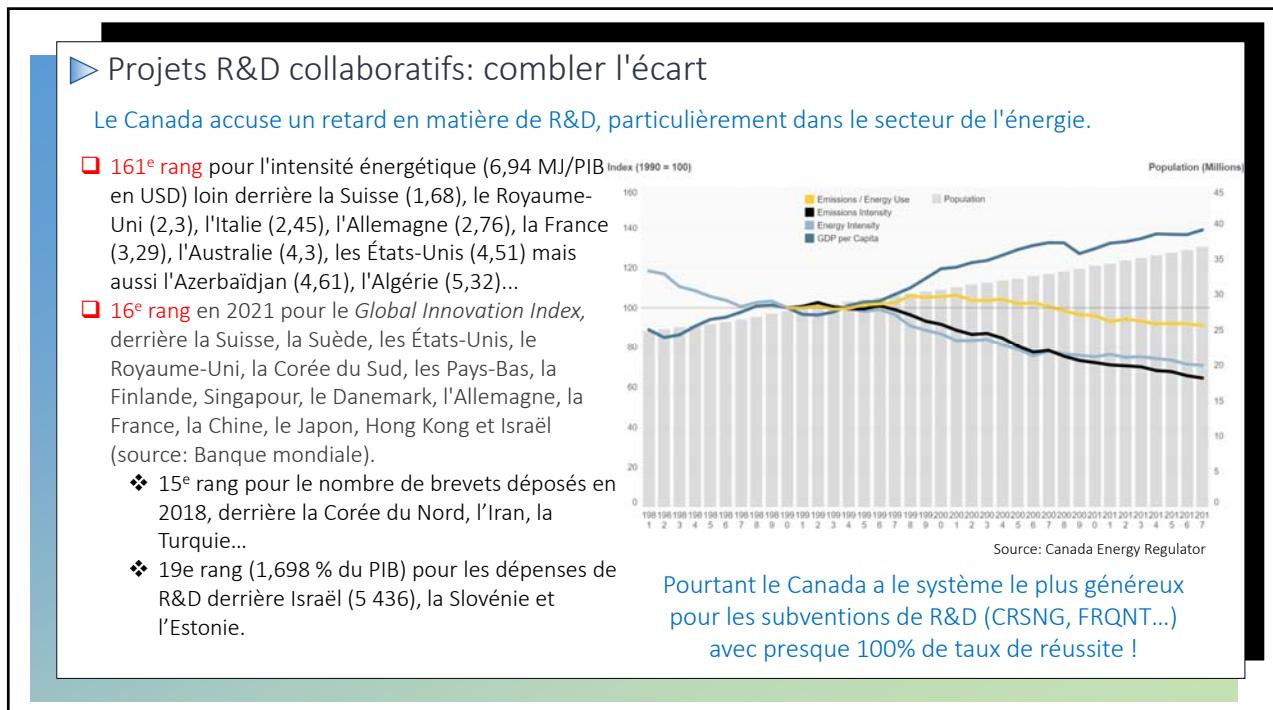


Remarque : horizon temporel de 40 ans; application pour le chauffage des locaux et l'eau chaude. Le refroidissement n'est pas pris en compte dans cette analyse.

8



9



10

### ► Projets R&D collaboratifs: exemple de financement

Contribution annuelle	1 partenaire industriel ou plus	CRSNG Alliance option 1	Innovéé (ou n'importe quel RSRI)	Budget de recherche
En argent (\$)	100,000	200,000	100,000	400,000
En nature	100,000	-	-	100,000

- Projet de 3 à 5 ans
  - Rédaction de la proposition par le professeur
  - Contrat de propriété intellectuelle signé avant le début du projet
  - Cotisations annuelles à Innovéé
  - Coût final pour les partenaires : max. 65 000\$ / an après crédits d'impôts
  - Budget pour (juste un exemple):
    - 1 équipe : 1 ou plusieurs enseignants-chercheurs, 1 chercheur professionnel, 6 docteurs
    - 150 000\$ pour l'achat d'équipements/matériels pour le projet (transférable aux partenaires)
    - Frais de fonctionnement (ordinateurs, déplacements...)
  - Livrables:
    - Formation de personnel hautement qualifié (futurs employés)
    - Publications scientifiques
    - Développement d'outils numériques
    - Développement de prototypes expérimentaux
- ➡  Nouvelle connaissance  
 Augmentation du TRL

11

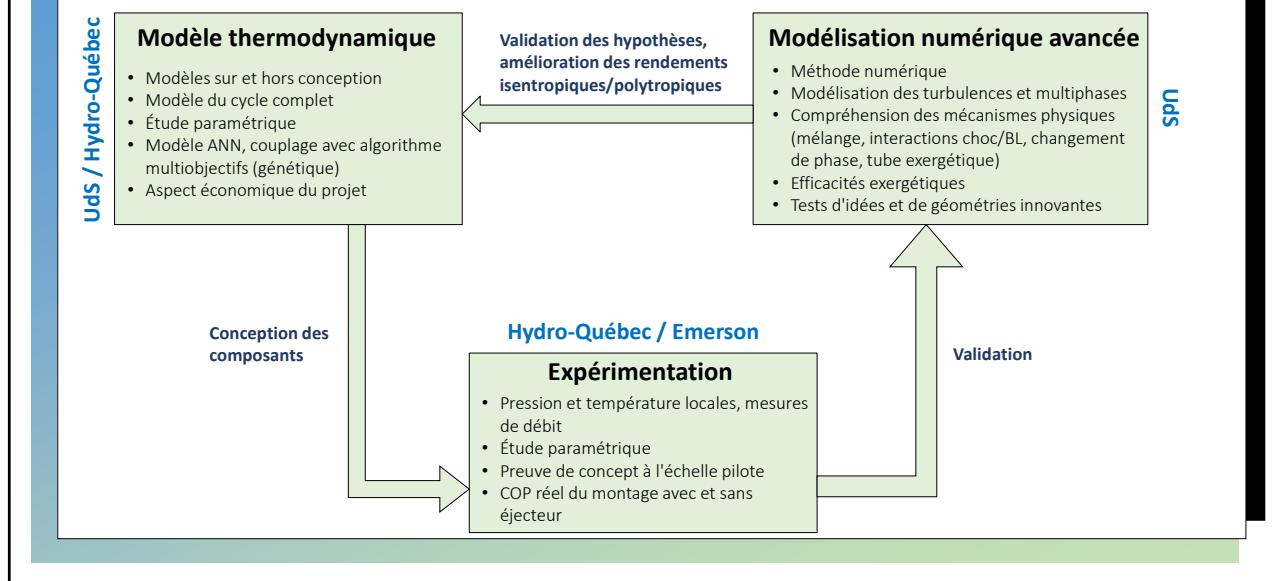
### ► Projets R&D collaboratifs: chaire de recherche CRSNG en efficacité énergétique industrielle

- Période : 2014-2024
- Budget total : 5,17 millions CAD
- Formation de PHQ (55) : 4 PD (1), 15 PhD (8), 5 PhD invités, 9 MScA (1), 11 étudiants de premier cycle (1)
- Publications (96) : 39 articles de revues, 57 articles de conférence.
- Nouveau laboratoire sur la caractérisation des fluides caloporteurs complexes; de nouvelles installations expérimentales tant à l'UdS que chez les partenaires
- Développement de nouveaux outils numériques (algorithmes multiobjectifs, modèles thermodynamiques et CFD)
- Organisation de 2 conférences nationales et 1 internationale
- Collaborations au Canada (UQAC), Belgique (UCLouvain), France (INSA Lyon)
- Gain d'attractivité associé
  - ✓ 10 nouveaux partenariats
  - ✓ Formation de PHQ (41) : 6 PD (4), 8 PhD (3), 6 MscA (2), 12 étudiants de premier cycle
  - ✓ Publications (93) : 38 articles de revues, 50 articles de conférence, 5 rapports industriels
  - ✓ Collaborations au Canada (McGill, ETS, ULaval), France (INSA Rouen, IMT Atlantique), Italie (UVicenza), Iran (Babol U), Australie (Brisbane U), ...

12

► Projets R&D collaboratifs: rôle de chaque partenaire & méthodologie

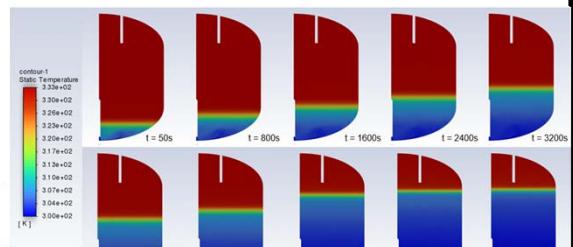
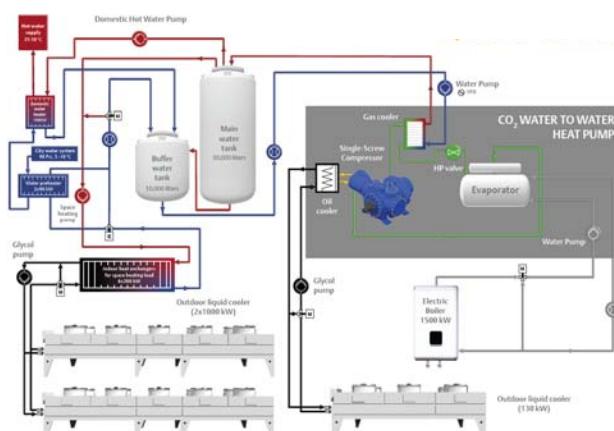
Exemple pour un cycle de pompe à chaleur CO<sub>2</sub> transcritique



13

► Projets R&D collaboratifs: exemple 1

Pompe à chaleur industrielle de démonstration ayant une capacité nominale de 4,6 MMBtu à 140°F  
(TRL7→TRL9)



14

► Projets R&D collaboratifs: exemple 2

Cascade de compression basée sur les éjecteurs

Prototype à l'échelle d'un système de réfrigération pilote ayant une capacité nominale de 4,5 TR à -25°C ([TRL3→TRL6](#))

	$T_e = 25^\circ\text{C}$	$T_e = 35^\circ\text{C}$				
	1-stage CO <sub>2</sub>	Cascade	$\Delta\text{COP}(\%)$	1-stage CO <sub>2</sub>	Cascade	$\Delta\text{COP}(\%)$
$T_c = -18^\circ\text{C}$	1.89	2.69	42.1	1.10	2.17	97.3
$T_c = -20^\circ\text{C}$	1.77	2.57	44.9	1.05	2.06	96.6
$T_c = -22^\circ\text{C}$	1.67	2.44	46.4	1.00	1.96	95.8

15

► Résultats scientifiques : cycle de réfrigération basé sur un éjecteur entraîné par la chaleur

Cycle de réfrigération de base

Cycle de réfrigération thermique (HDRC)

Coefficient de performance

$$\text{COP} = \frac{Q_{\text{evaporator}}}{W_{\text{compressor}}}$$

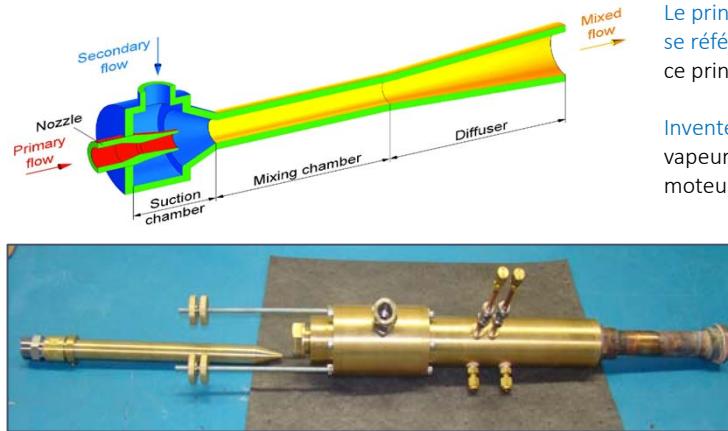
Coefficient de performance

$$\text{COP}_{\text{HDRC}} = \frac{Q_{\text{evaporator}}}{Q_{\text{generator}} + W_{\text{pump}}}$$

16

► Résultats scientifiques: principe d'un éjecteur supersonique

**ÉJECTEUR**: composante capable de créer un **vacuum** en accélérant un **gaz ou liquide** (flux primaire) dans une tuyère. Il peut être utilisé pour aspirer un fluide (flux secondaire). Dépendamment de l'application, l'éjecteur est également connu sous les noms d'injecteur, de pompe à jet ou de thermo-compresseur de vapeur.



Le principe de fonctionnement peut être expliqué en se référant au tube Venturi; l'atomiseur opère selon ce principe.

Inventé en 1859 par Henri Giffard; utilisation de la vapeur produite par une bouilloire en tant que fluide moteur pour pomper l'eau dans la bouilloire.

Dimensions typiques	Réfrigération / désalination
Ø col de la tuyère (mm)	1 / 500
Ø sortie de la tuyère (mm)	15 / 1 000
Ø de la section constante (mm)	20 / 1 500
Longueur (mm)	400 / > 20 000

17

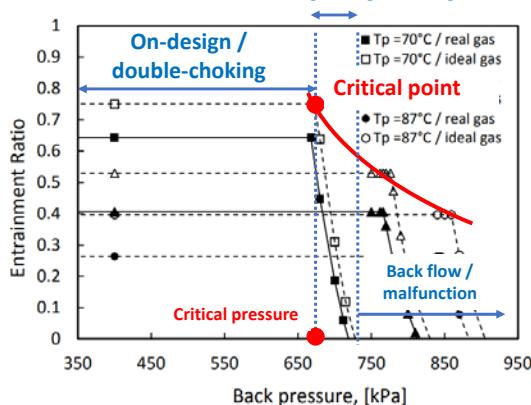
► Résultats scientifiques: principe d'un éjecteur supersonique

2 indicateurs de performance

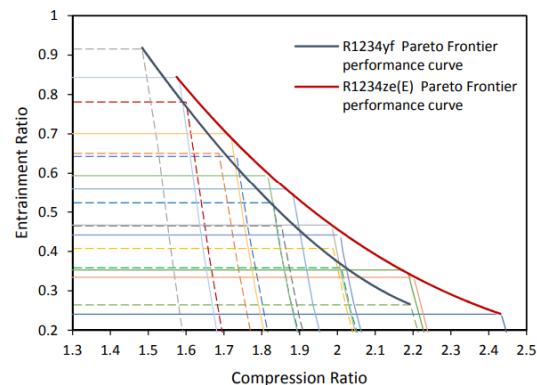
$$\text{Taux d'entraînement : } \omega = \dot{m}_s / \dot{m}_p$$

$$\text{Ratio de compression : } \Gamma = P_{out} / P_s$$

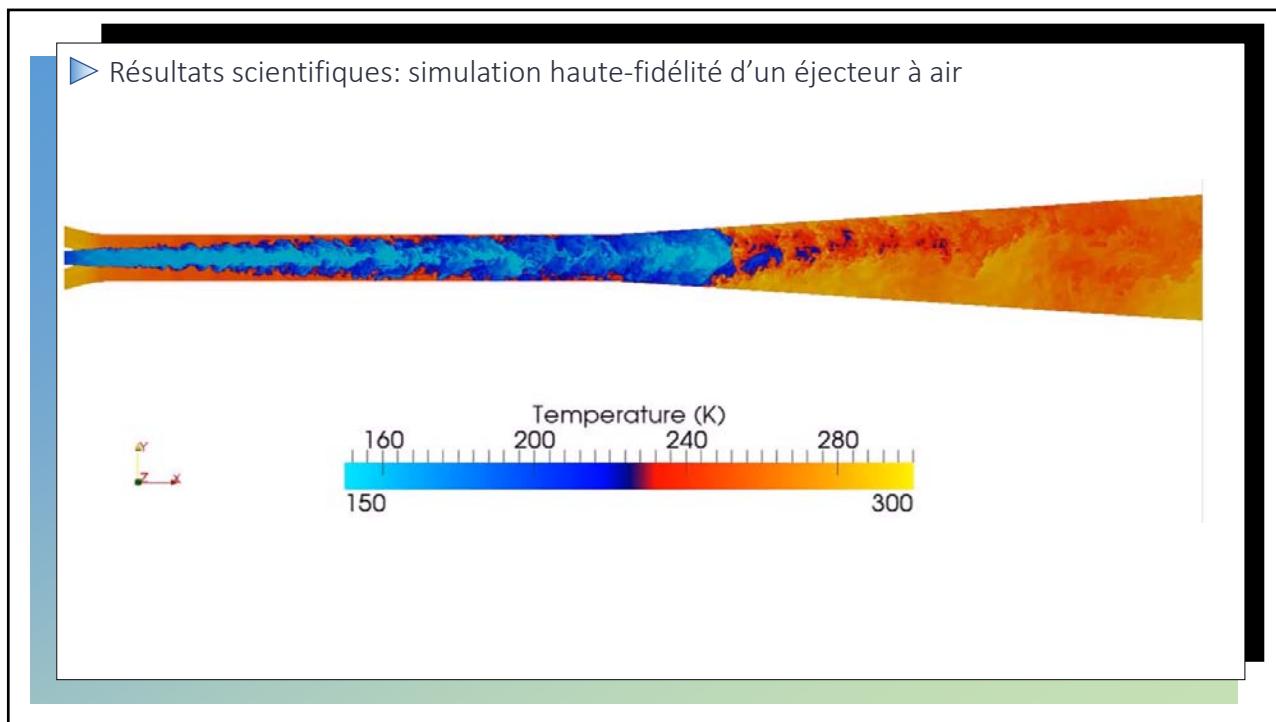
Off-design / single-choking



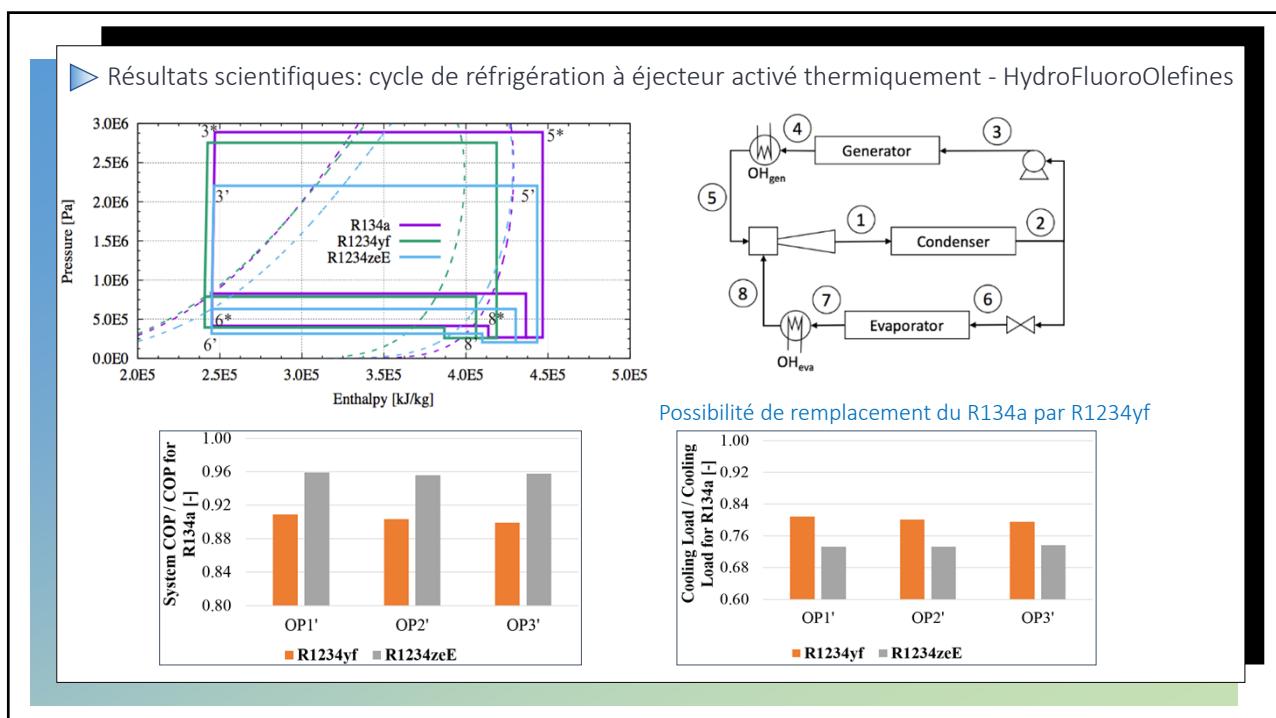
Efficacité intrinsèque relativement basse (jusqu'à 30% d'après Elbarghithi et al., 2020).



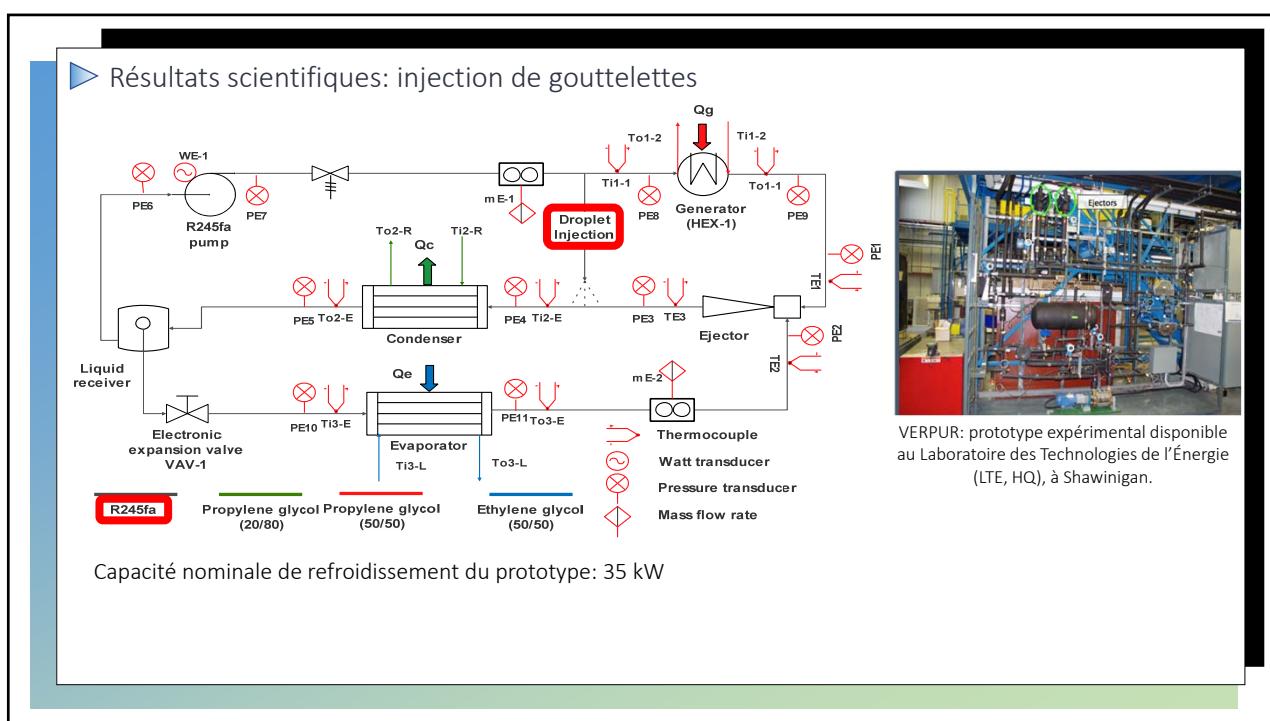
18



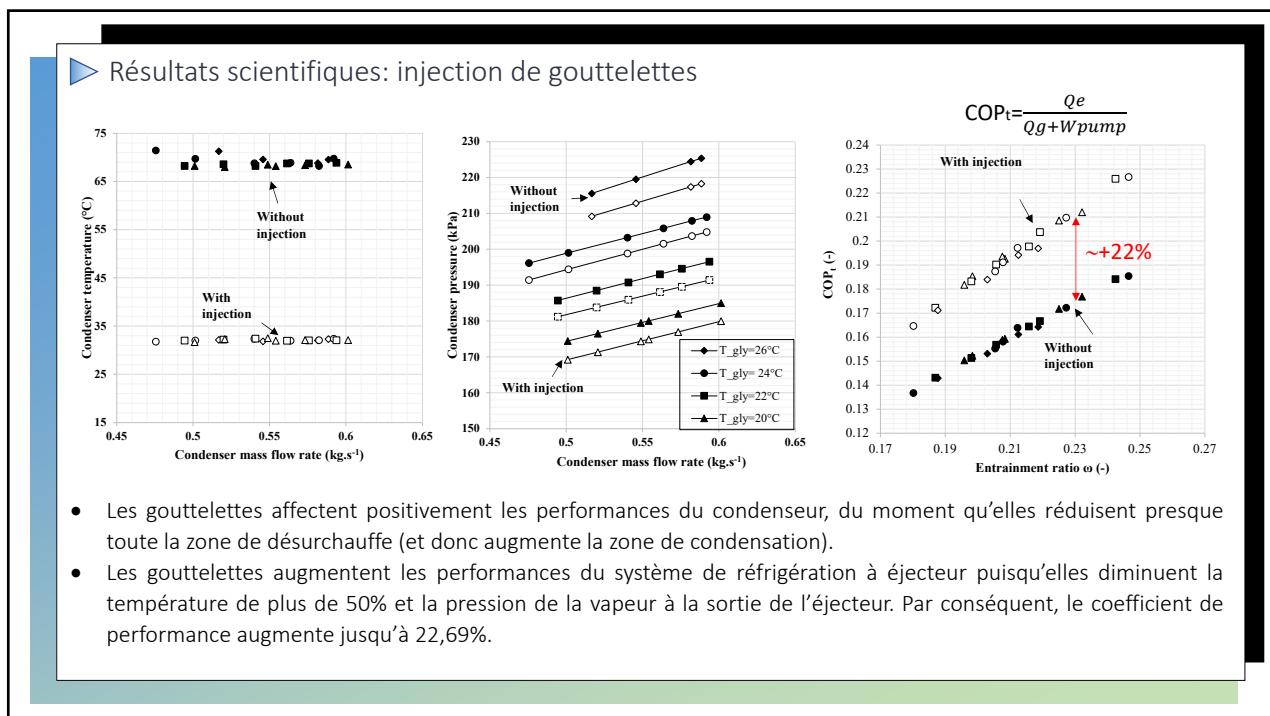
19



20



21



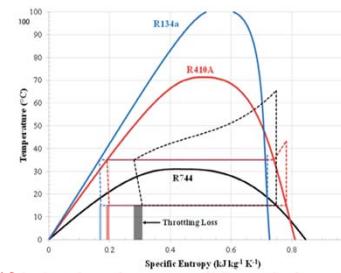
22

► Résultats scientifiques: système au CO<sub>2</sub> transcritique

Working fluids	GWP	ODP
R11	4750	1
R12	10,900	1
R22	1790	0.05
R134a	1370	0
R410a	2100	0
R245fa	1050	0
R290 (Propane)	20	0
<b>R744 (CO<sub>2</sub>)</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
R717 (Ammoniac)	0	0

Property	Value
molar mass [kg.mol <sup>-1</sup> ]	0.0440098
ASHRAE class	A1
Triple point temperature [K]	216.59
Triple point Pressure [Pa]	517964.34
Critical point temperature [K]	304.12
Critical point pressure [MPa]	7.3773
Critical point density [kg.m <sup>-3</sup> ]	467.6

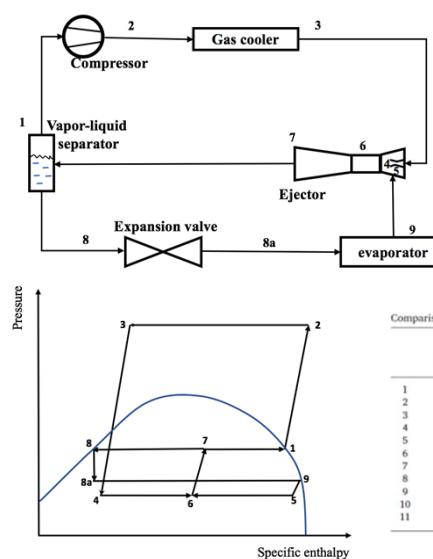
- Les cycles de réfrigération au CO<sub>2</sub> opèrent en conditions transcritiques ou sous-critiques.



- Dans un cycle de réfrigération, la perte d'énergie lors de l'expansion du CO<sub>2</sub> est supérieure à celle des réfrigérants synthétiques.

23

► Résultats scientifiques: éjecteur transcritique au CO<sub>2</sub> – cycle de récupération de l'énergie d'expansion (EERC)



Experimental and simulation operating conditions of the heat pump.

	T <sub>gc,in,ex</sub> (°C)	T <sub>ev,in,ex</sub> (°C)	P <sub>gc</sub> (kPa)	P <sub>ev</sub> (kPa)	m <sub>gc,ex</sub> (kg/s)	m <sub>ev,ex</sub> (kg/s)	m <sub>CO2</sub> (kg/s)
1	18.04	27.39	10621.69	2780.36	0.081	0.764	0.058
2	24.47	18.34	10615.86	2665.51	0.086	0.604	0.054
3	22.05	27.09	10698.89	2701.24	0.086	0.763	0.055
4	21.81	21.58	10501.73	2675.69	0.087	0.755	0.055
5	19.18	12.83	9919.73	2597.37	0.085	0.751	0.055
6	15.83	17.69	9862.84	2601.32	0.083	0.745	0.055
7	12.43	17.77	10094.63	2736.76	0.074	0.745	0.060
8	12.50	17.65	10668.26	2762.26	0.063	0.744	0.058
9	18.86	17.77	11222.70	2984.54	0.208	0.741	0.067
10	18.65	18.01	11341.68	3052.54	0.208	0.741	0.070
11	18.78	18.19	11134.95	3017.43	0.291	0.738	0.069

Comparison of energy performance between basic and ejector heat pump cycles.

Basic cycle	Ejector cycle	Difference (%)	Q <sub>gc</sub> (kW)			W <sub>comp</sub> (kW)		
			Basic cycle	Ejector cycle	Difference (%)	Basic cycle	Ejector cycle	Difference (%)
1	3.397	3.749	10.70	18.29	22.12	20.91	5.399	5.899
2	3.176	3.556	11.98	16.74	20.02	24.95	5.271	5.381
3	3.269	3.662	12.04	17.43	21.63	24.10	5.33	5.906
4	3.283	3.662	11.55	17.27	21.24	22.97	5.259	5.799
5	3.334	3.678	10.32	16.81	20.18	20.02	5.041	5.485
6	3.42	3.764	10.07	17.21	20.48	19.06	5.03	5.442
7	3.428	3.769	9.94	17.89	21.15	18.21	5.219	5.612
8	3.24	3.545	9.42	17.47	21.10	20.79	5.392	5.952
9	3.715	4.062	9.34	21.40	24.10	12.62	5.761	5.933
10	3.764	4.122	9.50	22.05	24.85	12.69	5.858	6.029
11	3.784	4.133	9.22	21.82	24.46	12.08	5.767	5.918

24

► Résultats scientifiques: éjecteur transcritique au CO<sub>2</sub> – cycle de récupération de l'énergie d'expansion (EERC)

Device	Ejector performance				
	EERC	LCR	CDPC	VJRC	Base case
<b>COP</b>	<b>3.618 (+23%)</b>	2.935	2.906	0.6476	2.938
<b>ER</b>	0.564	0.641	<b>1.558</b>	0.921	-
<b>P<sub>ratio</sub></b>	<b>1.15</b>	1.03	1.01	1.11	-

LCR: Liquid Recirculation Cycle      CDPC: Compressor Discharge Pressure Cycle (ejector used as a second stage compressor)      VJRC: Vapor Jet Ejector Cycle (single-phase ejector for utilization of low-grade energy)

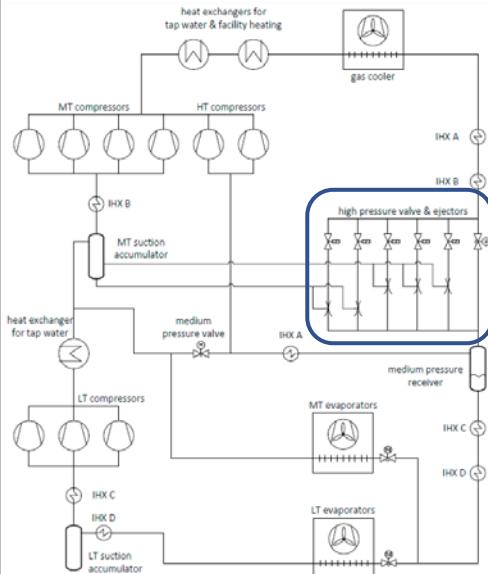
25

► Résultats scientifiques: système d'éjecteurs à puissance variable

- Éjecteur avec pointeau amovible dans la tuyère**
  - Module le débit massique du fluide primaire afin d'ajuster la capacité frigorifique en permettant d'opérer dans la zone «on-design», tout en étant proche du point de fonctionnement critique selon les conditions;
  - Expérimentation en cours CanmetEnergie-Varennes sur éjecteur utilisant le R245fa;
  - Proposé par Carel (TRL=9)
- Stratégie de modulation par pulsation**
  - Module le débit massique du fluide primaire en contrôlant l'ouverture/fermeture de la valve solénoïde (intervalle de temps typique 3-6 s);
  - Initialement testée par Gullo et al. (2021) pour un système de compression transcritique au R744 de petite capacité;
  - Proposé by Danfoss (TRL=5-6)
- Éjecteurs en parallèle**
  - Module la capacité frigorifique en combinant des éjecteurs de différentes tailles;
  - Expérimentation en cours à CanmetEnergie-Varennes sur éjecteur utilisant l'air;
  - Proposé par Danfoss (TRL=9)

26

► Résultats scientifiques: systèmes de réfrigération à éjecteurs dans les supermarchés



Système de réfrigération de supermarché du type Booster transcritique au R744 avec 2 niveaux d'évaporation (LT et MT), utilisant un module multiéjecteur, Schönenberger (2016).

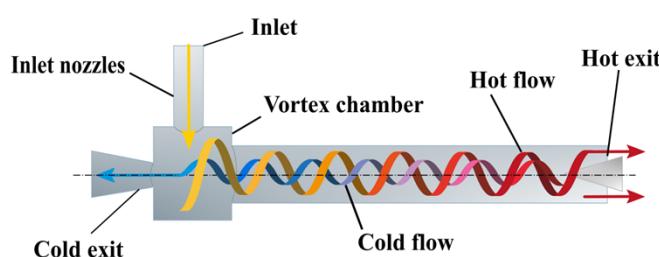
Average Annual temp [C]	Energy saving compared to Booster CO2 system						
	HP ejectors	LP ejectors	Flooded Operation				
	Parallel compression	Parallel comp. + HP ejectors	Booster sys.	Booster sys. with Liquid ejector	Parallel comp. sys. with liquid ejector	LP Ejector system with Liquid ejectors	HP ejector system with Liquid ejectors
0	5%	6%	2%	10%	15%	13%	17%
5	5%	7%	3%	10%	16%	14%	18%
10	6%	9%	5%	10%	16%	16%	20%
15	7%	12%	9%	10%	17%	19%	23%
20	7%	15%	13%	10%	18%	24%	27%
25	8%	17%	15%	10%	18%	26%	29%
30	6%	16%	15%	10%	17%	27%	27%

Source: Madsen and Kriezi (2018)

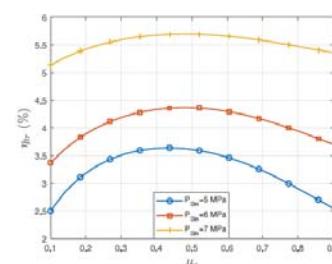
Lire l'article de Gullo et al., Multi-Ejector Concept: A Comprehensive Review on its Latest Technological Developments, *Energies*, 12(3), 406, 2019.

27

► Résultats scientifiques: description d'un tube à vortex



- Le courant haute pression se détend et se sépare en deux écoulements à une pression inférieure dont l'un est chaud et l'autre est froid.
  - ✓ Déntente isentropique à l'entrée.
  - ✓ Gradient de pression dans la chambre à cortex.
  - ✓ Conservation de l'énergie.
- Une composante simple, sans partie mobile, à faible coût, fiable, mais à faible efficacité intrinsèque.
- Avantages des écoulements séparés dans les pompes à chaleur et les systèmes de réfrigération.
- Applications: démarrage à froid des véhicules électriques, CAES, ...

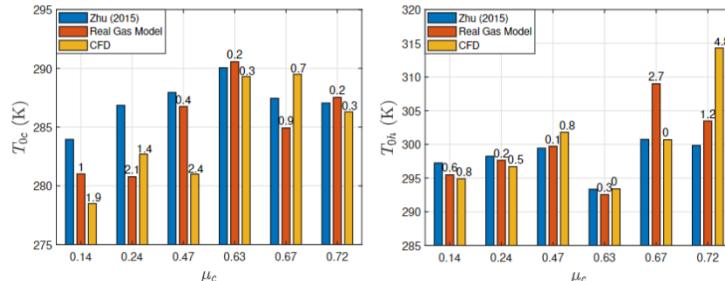


Modèle analytique de Mansour et al. (2022) pour le CO<sub>2</sub>

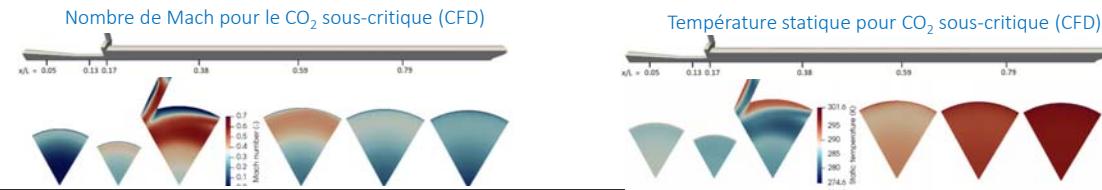
28

► Résultats scientifiques: tube à vortex pour CO<sub>2</sub>

Operating Parameter	Value
$P_{in}$ (kPa)	356 - 1883
$T_{in}$ (K)	293.8 - 297.3
$m_{in}$ (g/s)	2.1 - 10
Z	0.9 - 0.98
Methodology comp.	Cold exit
RGM vs. Exp.	4.3%
IGM vs. Exp.	6.4%
Hot exit	2.8%
	5.8%



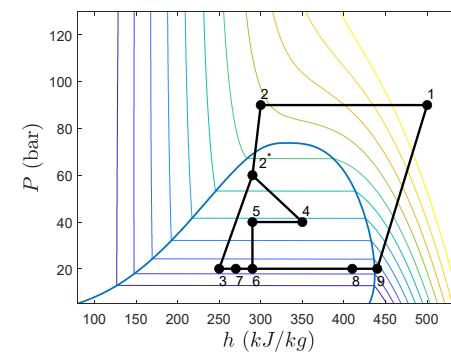
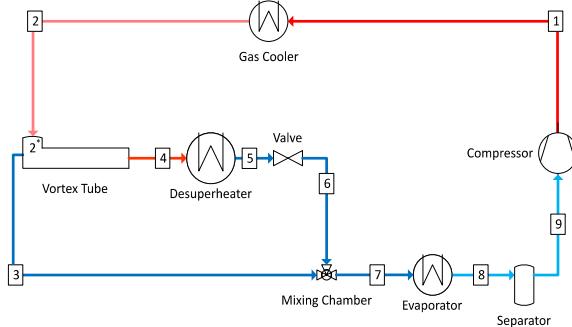
- Un modèle analytique d'un gaz réel a été validé avec succès en comparant les résultats avec les données expérimentales de Zhu (2015) pour le CO<sub>2</sub> et d'autres données pour l'air, le propane et le R134a. Il performe mieux que les modèles CFD avancés.
- L'efficacité de séparation (liquide/gaz) est un facteur clé qui demeure inconnu pour les prototypes expérimentaux.



29

► Résultats scientifiques: intégration d'un tube à vortex dans une thermopompe au CO<sub>2</sub>

- Revue de la littérature:
  - ✓ Thermopompe en cascade par Dubey *et al.* (2015): 5,9 % d'amélioration du COP<sub>h</sub>.
  - ✓ Analyse du cycle de Maurer par Patil *et al.* (2020): 3 % d'amélioration du COP<sub>h</sub> avec une efficacité modérée du second rendement thermodynamique.
- Intégration proposée du tube à vortex:



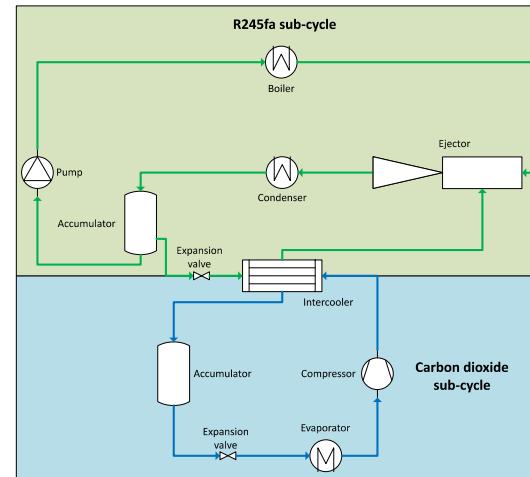
30

► Résultats scientifiques: validation du modèle thermodynamique

Input Parameter	Value
$P_{R245fa}$ (bar)	1.06 (saturated vapor)
$\dot{m}_{R245fa}$ (kg/s)	0.138
$\dot{m}_{glycol}$ (kg/s)	0.976
$T_{glycol}$ (K)	267.11
$\eta_{vol}$	0.81
$\eta_{is}$	0.64
$\eta_{iz,o}$	0.62

Parameter	Experiment	Model	Error %
$P_{dis}$ (bar)	53.3	53.95	1.2
$P_{suc}$ (bar)	21.69	21.29	1.85
$T_{dis}$ (K)	352.1	354.8	0.8
$T_{suc}$ (K)	267.5	267.1	0.1
$\dot{m}_{CO_2}$ (kg/s)	0.093	0.095	2.8
$W_{comp}$ (kW)	6.125	6.552	7
$Q_h$ (kW)	26.957	22.808	15.4
$Q_c$ (kW)	17.072	16.485	3.4

L'augmentation maximale entre VTHP et CHP est de 31 % alors que le minimum est de 16,5%.



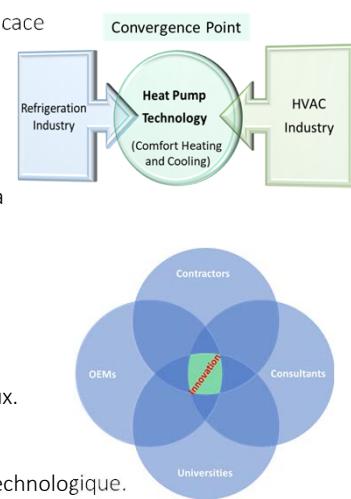
Prototype expérimental (VERPUR) développé au Laboratoire des Technologies de l'Énergie (LTE, HQ) à Shawinigan

31

► Conclusions et perspectives

- La pompe à chaleur est une technologie clé dans le contexte de la transition énergétique et deviendra une solution standard dans un avenir proche pour plusieurs applications dans le bâtiment et l'industrie.

- ❑ La croissance rapide du marché requiert des méthodes de production efficace et rentables afin de demeurer compétitif.
- ❑ De nouvelles méthodes, composantes et produits doivent être respectivement établies, intégrées et développés.
- ❑ L'optimisation est nécessaire pour simplifier l'installation et augmenter l'efficacité opérationnelle.
- ❑ Les réfrigérants naturels et à faible PRG sont incontournables au vue de la réglementation environnementale de plus en plus contraignante.
- ❑ La connectivité et le stockage thermique sont cruciaux dans le but d'offrir la flexibilité nécessaire pour participer à la gestion de la demande.



- L'innovation technologique est un choix stratégique pour l'atteinte des objectifs à long terme en matière d'efficacité énergétique et de développement durable.

- ❑ Le Canada possède un des système de subventions R&D des plus généreux.
- ❑ L'innovation va au delà de la recherche et du développement.
- ❑ L'approche systémique et collaborative est un accélérateur du progrès.
- ❑ Les universités jouent un rôle central dans l'écosystème de l'innovation technologique.

32



**THERE IS NO  
PLANET B**

“Waiting for legal requirements” is not only insufficient  
in terms of sustainable management, but also  
dangerous in a business, entrepreneurial sense.