



# Intérêt du stockage de froid pour la flexibilité des systèmes énergétiques

Anthony Delahaye et Minh Hoang, Irstea  
Unité de recherche Génie des Procédés Frigorifiques

[anthony.delahaye@irstea.fr](mailto:anthony.delahaye@irstea.fr)

[hong-minh.hoang@irstea.fr](mailto:hong-minh.hoang@irstea.fr)





# Sommaire

- Présentation d'Irstea et de GPAN
- Contexte et enjeux liés au froid
- Solutions pour la flexibilité : stockage et effacement
- Exemple de projets de recherche à Irstea / GPAN
- Conclusion et perspectives de développement

# **Irstea** Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

Créé en 1981 sous le nom de Cemagref, 1600 collaborateurs, 9 centres, 17 UR, 5 UMR

## **3 départements**

**Eau** : Ressources, milieux, usages, aléas et risques

**Ecotechnologies** : Réseaux, épuration, déchets, froid, agroéquipements

**Territoires** : Développement territorial, écologie, biodiversité, risques et vulnérabilité

\* \* \* \* \*

## **Unité de recherche GPAN** Génie des procédés frigorifiques

### **2 équipes (20 permanents)**

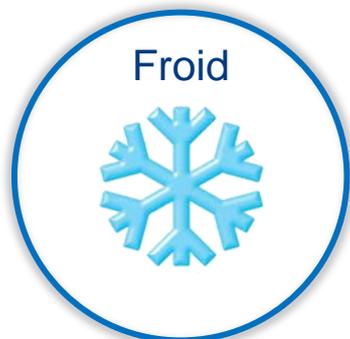
**METFRI** : Maîtriser et modéliser les procédés physiques de préservation des produits par le froid

**ENERFRI** : Concevoir des technologies frigorifiques économes en énergie et respectueuses de l'environnement



# Contexte et enjeux liés au froid

# Enjeux énergétiques et environnementaux



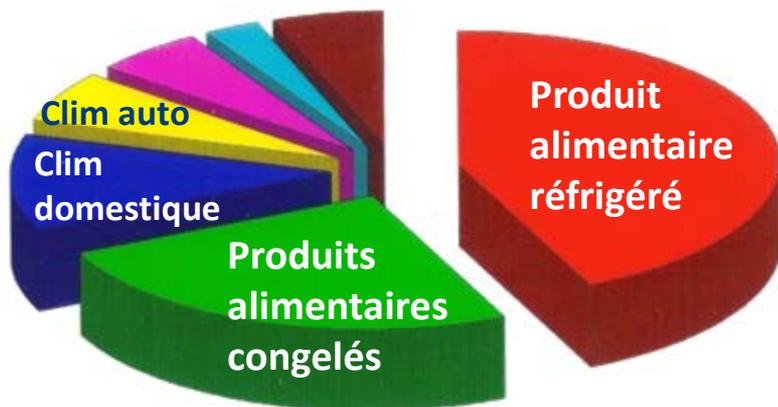
- **Besoin fondamental de développement**  
Alimentaire, climatisation, industrie, chimie, électronique, médical...
- **Impact des fluides frigorigènes**
  - 1987 : CFC interdit (Couche d'ozone)
  - HFC : **GES** ↗ de 60 % depuis 1990
- **Impact énergétique**  
Industrie, Transport, Résidentiel (23% : foyers)  
**17 % conso électrique**

~ 8 % rejets  
de GES

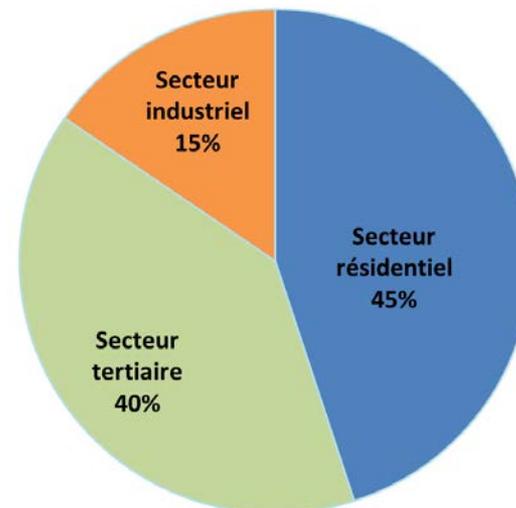
➔ **Réchauffement climatique : + 3 °C équivaut à + 10 % consommation électrique**

# Importance relative des activités liées au froid

Répartition des activités économiques liées au froid par application



Répartition des consommations électrique liées au froid par secteur

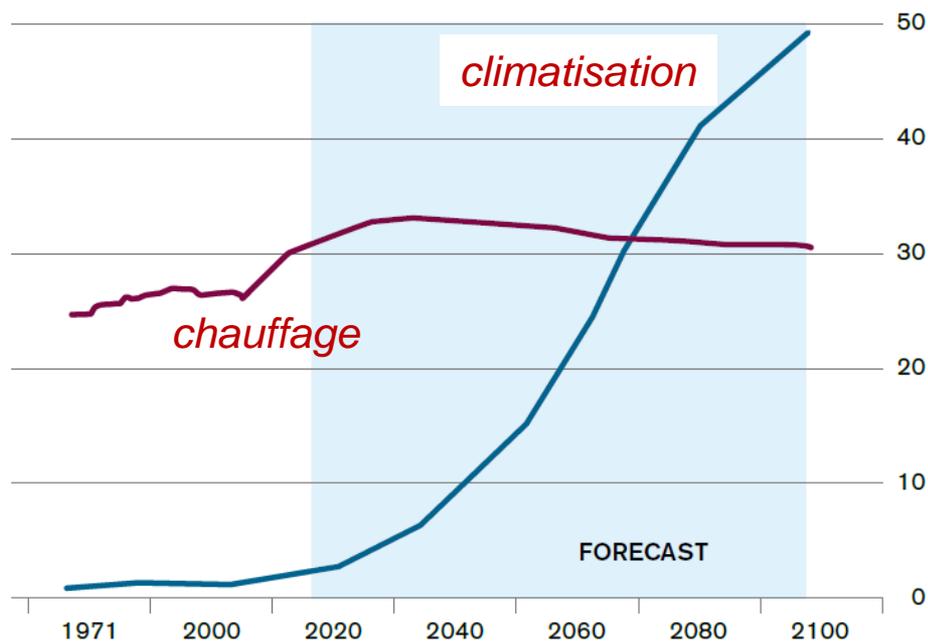


**17 % consommation électrique**

Source : Institut International du Froid, Nov. 2015

# Le froid pour la climatisation

Forte augmentation : confort thermique et procédés industriels (informatique, biotechnologies...)



Prévision mondiale de demande énergétique en  $10^{18} \text{ J}$  pour la climatisation et le chauffage

Source : PBL Agence néerlandaise d'évaluation environnementale

5 % de la consommation électrique mondiale

# Autres applications



Produits pharmaceutiques



Refroidissement des data-centers



Production LNG



Canons à neige



Gestion énergétique  
Solutions pour la flexibilité :  
Effacement et Stockage

# Gestion énergétique

- Le plupart des systèmes naturels ou anthropiques disposent des moyens de stockage

*Nourriture dans le corps*



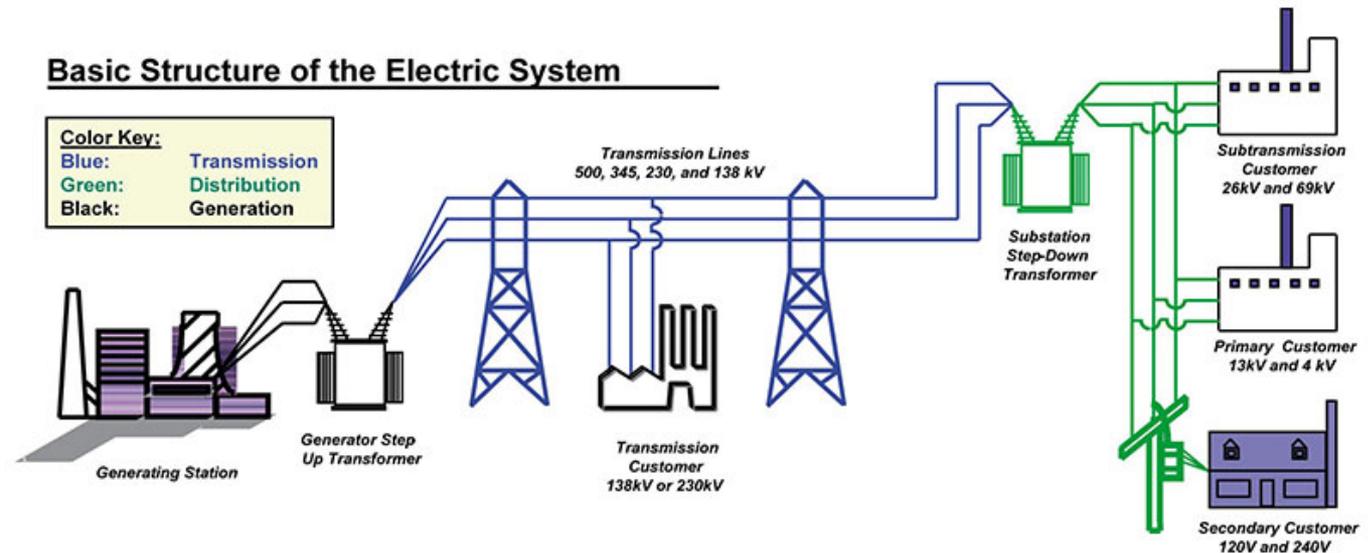
*Carburant d'une voiture*



*Batterie du téléphone*

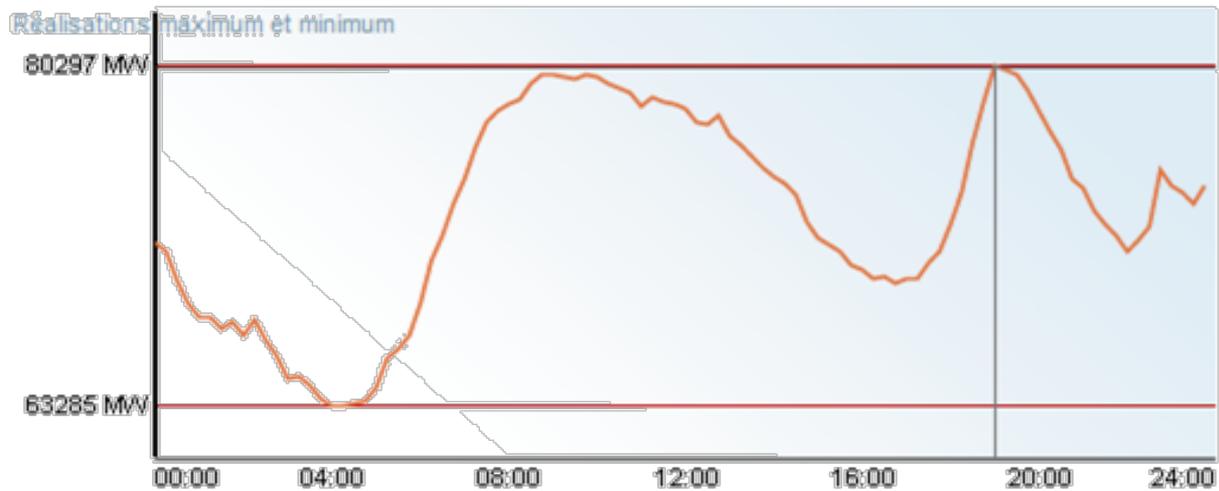


- Cependant, un des systèmes les plus grands et importants, le réseau d'électricité n'a quasiment pas de stockage !!!



### 3 solutions lors d'un pic de consommation pour équilibrer la production et consommation :

- Produire plus (centrale thermique ...)
- Consommer moins = EFFACEMENT
- STOCKAGE d'énergie



Consommation globale en France (RTE – réseau transport d'électricité)



# Stockage d'énergie

## Stockage thermique dans les systèmes frigorifiques

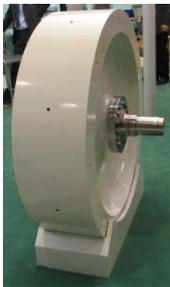
# Stockage d'énergie



Pompage-turbinage

Stockage d'énergie à l'air comprimé

Volant d'inertie



Batteries: énergie électrochimique

## Mechanical

Pumped Hydro-PHS

Compressed Air-CAES

Flywheel-FES

## Electrochemical

Secondary battery

Lead-acid/NaS/Li-ion

Flow battery

Redox flow/Hybrid flow

## Electrical

Capacitor  
Supercapacitor

Superconducting  
Magnetic-SMES

## Thermochemical

Solar fuels  
Solar hydrogen

## Chemical

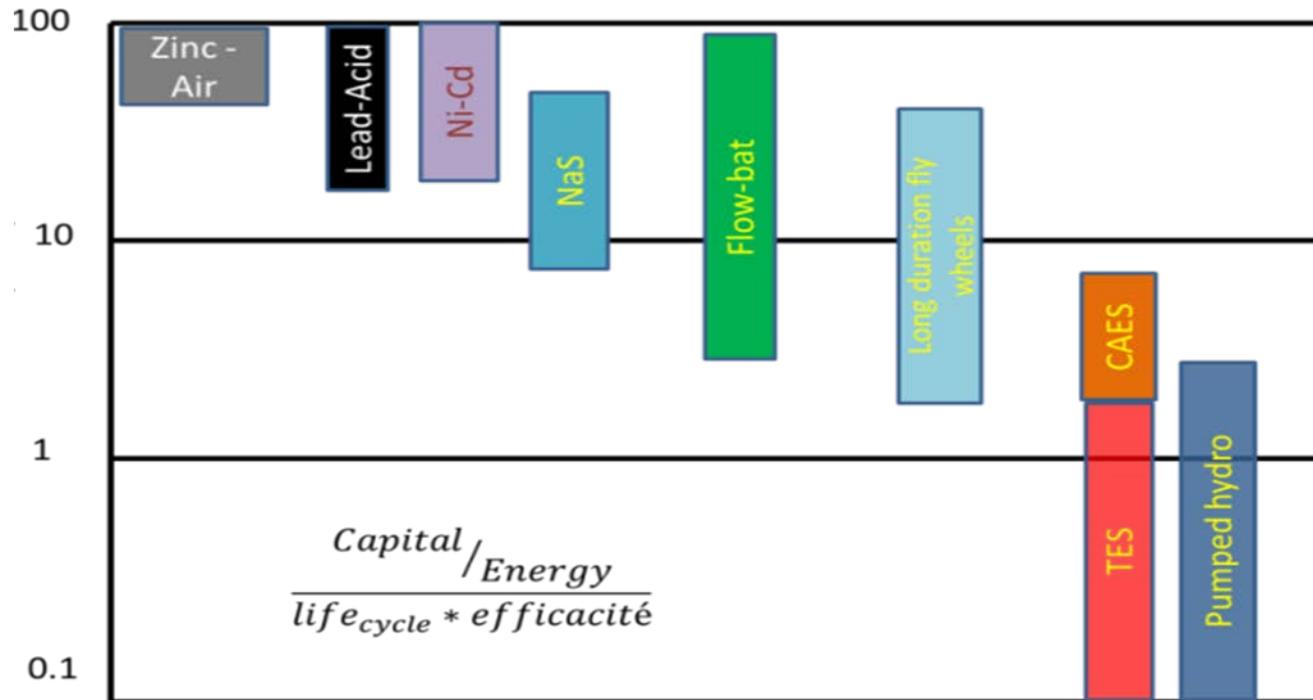
Hydrogen  
Fuel cell/Electrolyser

## Thermal

Sensible/latent  
heat storage

# Comparaison en fonction du coût

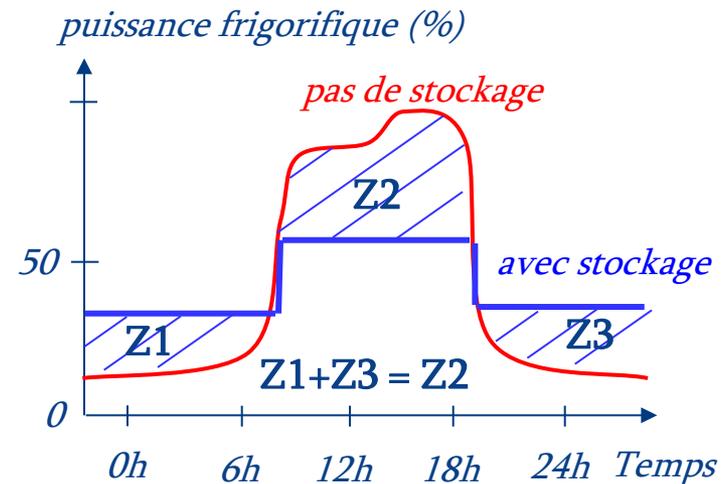
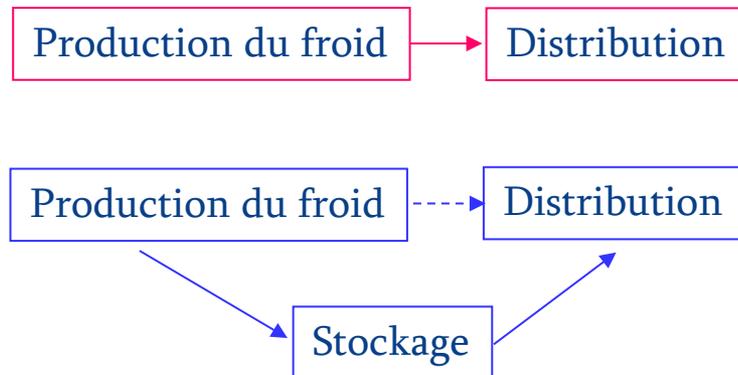
Capital cost per cycle (€/kWh out put)



MacCracken, 2010

TES :  
Thermal energy storage

*Stockage thermique : emmagasiner de l'énergie thermique dans des matériaux de stockage pour une utilisation ultérieure*



**Avantage du stockage du FROID**

***Stocker pendant la nuit : meilleure efficacité & coût d'électricité bas***

# Stockage thermique

- *Stockage par chaleur sensible* : utiliser la variation de température des matériaux  
Énergie sensible (J) = masse (kg) × chaleur spécifique (J / kg °C) × Δ T (°C)  
Exemple : eau glacée
- *Stockage par chaleur latente* : utiliser le changement de phase des matériaux  
Énergie latente (J) = masse (kg) × chaleur latente (J / kg )  
Exemple: glace, hydrate, paraffine ...



**Bénéficiaire de la chaleur latente : réserve d'énergie !**



1 kg d'eau

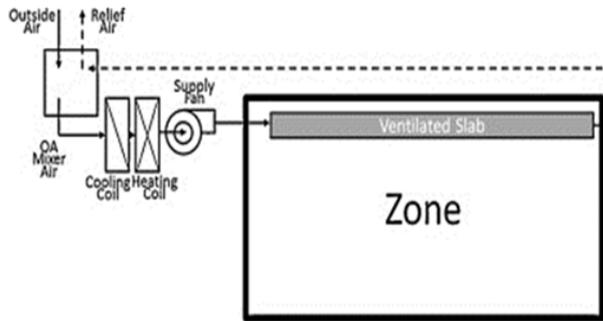
**21 kJ** (pour ΔT de 5 °C) : **chaleur sensible**

1 kg de glace

**333 kJ** : **chaleur latente**

70 % 30 %

**115 kJ** : **5 x l'équivalent d'1kg d'eau liquide (ΔT=5°C)**



**Actif** : avec un système mécanique supplémentaire (pompe, ventilation)



**Passif** : enveloppe du bâtiment, produits dans un entrepôt (inertie thermique)

## Stockage

**Dynamique** : frigoporteur diphasique

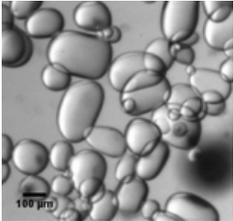


**Statique** : nodules, plaques

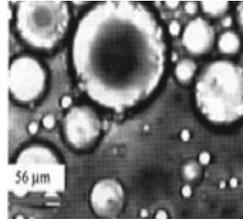


# Fluides Frigoporteurs Diphasiques (coulis)

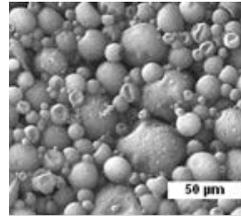
- FFD = Matériaux à Changement de Phase (MCP) dispersés dans un liquide



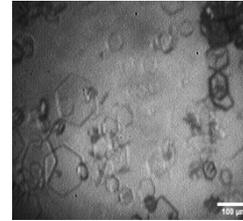
Glace  
*Stamatiou (2005)*



Paraffine  
*Xu (2005)*



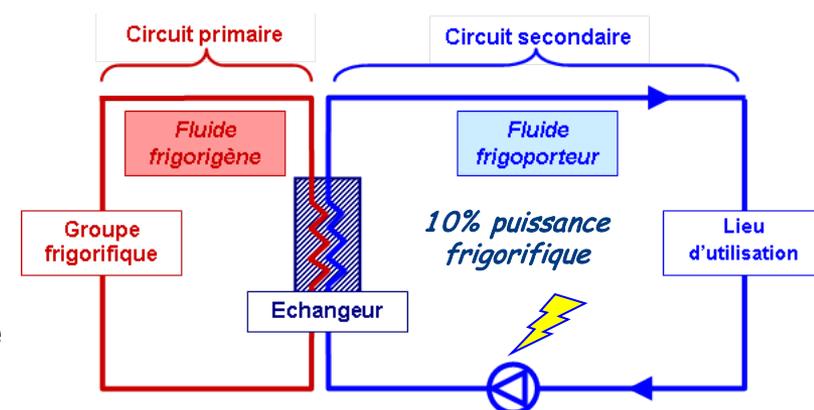
Microencapsulés  
*Gschwander (2006)*



Hydrate de TBPB  
*Clain (2015)*

**Applications**  
Supermarché  
Fromageries  
Cuisines centrales  
Climatisation

- Intérêt** : Energie : Coulis 25% (100 kJ/kg) ~ 5 x Liquide ( $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$ )
  - Neutre** : ↘ quantités de frigorigène (par 10)
  - Température stable** : ↗ Efficacité, Confort
  - Stockage** : ↗ Flexibilité, Efficacité
  - Design** : ↘ Débits-Puissances (Écrêtage)
  - Taille de cristaux** : 50-200 μm ↗ Thermique



## Exemple de projets de recherche à Irstea / GPAN

## *Exemples de projets R&D*

# CRISALHYD

**Application de coulis d'hydrates de CO<sub>2</sub> pour la réfrigération secondaire :  
de la cristallisation à leur intégration dans les procédés  
de stockage et transport du froid**

*Irstea, ENSTA - ParisTech, LIMSI (CNRS), Solvay, Heatcraft-Lennox*

Appel à projet ANR 2014  
DEFI 2 – Energie propre, sûre et efficace

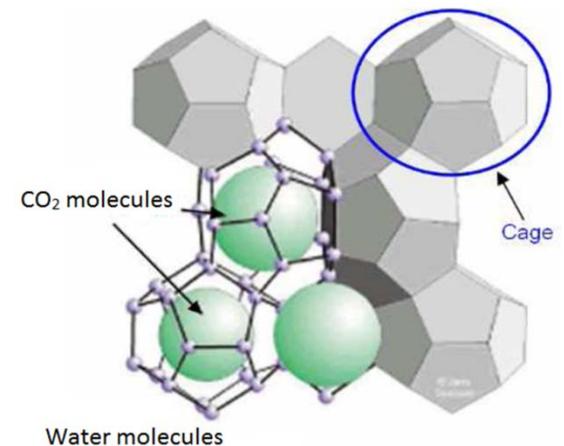
# Hydrates de gaz

## Matériaux de stockage performants

*Hydrate* : Structure solide similaire à la glace, capable de piéger des molécules de gaz  
ex :  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ , Sels (TBAB, TBPB)

*Coulis d'hydrates* : Mélange entre une phase solide hydrate et une phase porteuse eau

*Hydrate de  $\text{CO}_2$*



*Intérêt des coulils d'hydrates pour le stockage / transport du froid*

Chaleur latente (200-375 kJ/kg) ~ glace (333 kJ/kg)

Stable à  $T > 0$  (climatisation)

Formation par injection de  $\text{CO}_2$  (non mécanique)

# Développement des procédés utilisant le coulis d'hydrates

## Verrous scientifiques

Cinétique : lente, non maîtrisée

Distribution en taille : agglomération, croûtage

Modéliser et Optimiser le système

## Verrous techniques

Générateur de coulis : diminuer de 20 à 30 % le coût

Architecture : Production + Stockage + Boucle + Echangeurs

Système : Efficacité/COP, flexibilité/scénarios, Sécurité

# CRISALHYD

## Quelques résultats marquants ...

**Dimensionnement** : Comparaison systèmes eau / hydrates

Bloc	Eau	Hydrate
Production de froid (MWh)	1,3	1,3
Stockage V réservoir (m <sup>3</sup> )	1300	<b>179</b>
Distribution E pompage (kWh)	11,7	<b>12,5</b>
Utilisation S échangeur (m <sup>2</sup> )	7,9	<b>6,1</b>

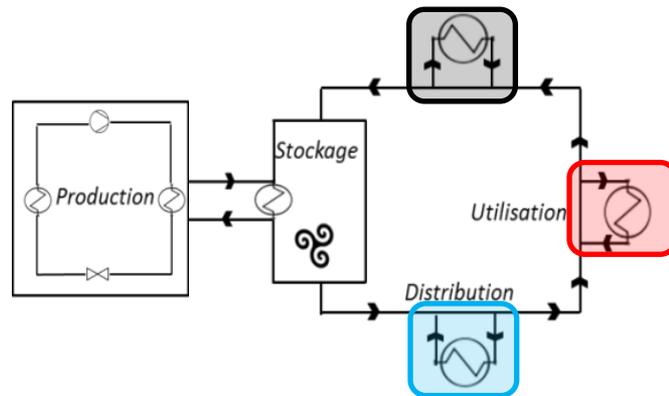
**Volume Stocké ↘ 87%**

**S échangeur ↘ 25%**

# CRISALHYD

## Quelques résultats marquants ...

### Développement d'un modèle Système (industriel)



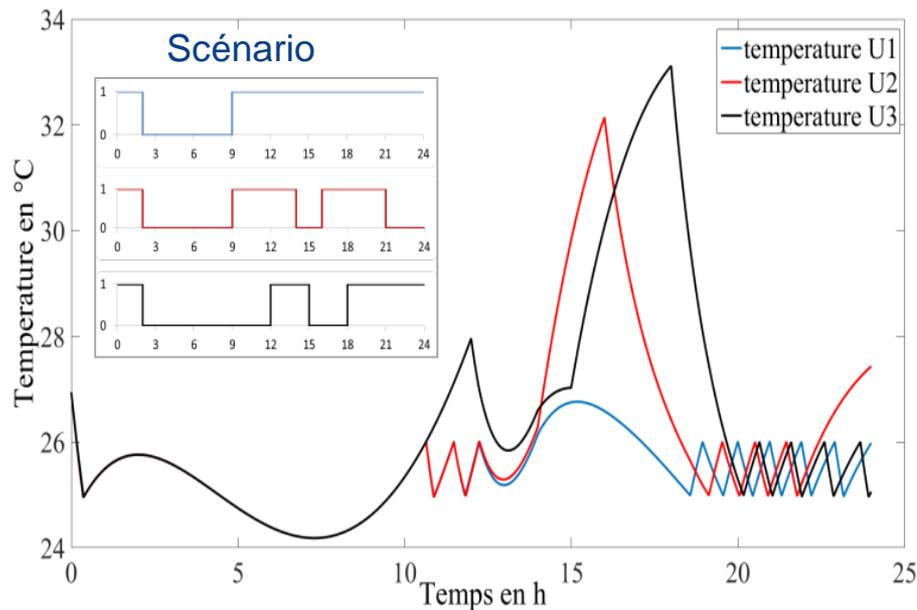
Réseau :

3 utilisateurs

$P_U = 100 \text{ kW}$

$L_{\text{tot}} = 240\text{m}$

$L_{U-U} = 20\text{m}$



**Modèle : Scénario -> Impact chez l'utilisateur**

T chez les utilisateurs dépend :

- scénario d'utilisation
- position sur la boucle
- température extérieure (jour / nuit)

Ex: entre 12 et 15h : décalages entre utilisateurs



Effacement d'électrique  
pour un équilibre entre la production et  
la consommation

## Définition de l'effacement

**Réduction temporaire du niveau de consommation d'un site vu du réseau électrique, en réponse à une sollicitation externe**

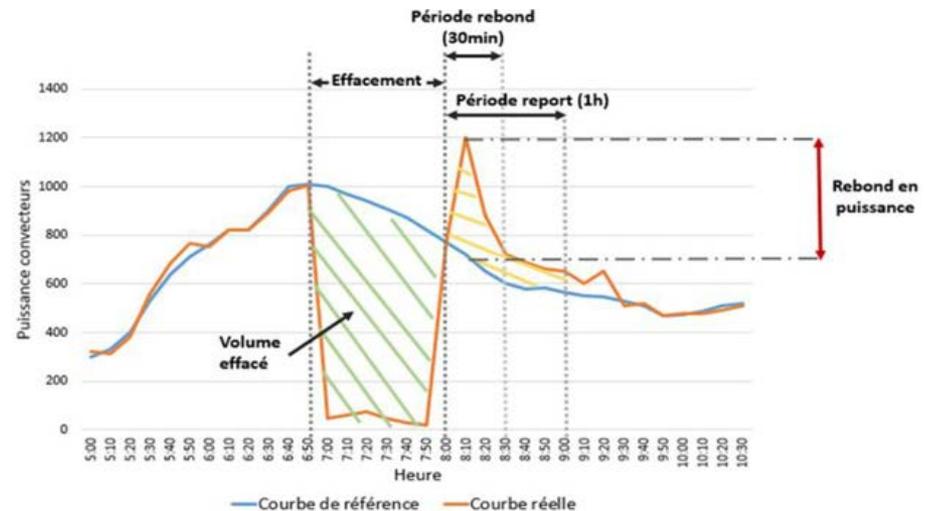
- Effacements fondés sur l'**autoproduction** (substituant le soutirage du réseau électrique par un groupe électrogène, cogénération,...)

→ *pas de réduction de la consommation des équipements ou process*



- Effacements fondés sur la **modulation (voire l'interruption) des process consommateurs**

→ *réduction réelle de la consommation des équipements ou process*



## Historique de l'effacement

**1965** : tarif « heures pleines/heures creuses »

*incitation d'utilisation des ballons d'eau chaude la nuit pour lisser la courbe de charge nationale*

**1982** : tarif **EJP** Effacements Jour de Pointe

*incitation à l'effacement de consommation lors des pointes hivernales compensant par un prix réduit le reste de l'année*

**2008** : création de la bourse européenne de l'électricité EPEX SPOT

*marchés électriques des pays européens (FR, DE, UK, BE, NL...)*

**2009** : mise en place appel d'offres effacement (contrat / rémunération de l'effacement)

**2011** : loi NOME - Nouvelle Organisation des Marchés de l'Electricité

*réponse aux exigences européennes relative à la concurrence*

**2013** : Création de mécanisme NEBEF - Notification d'Echanges de Blocs d'Effacement

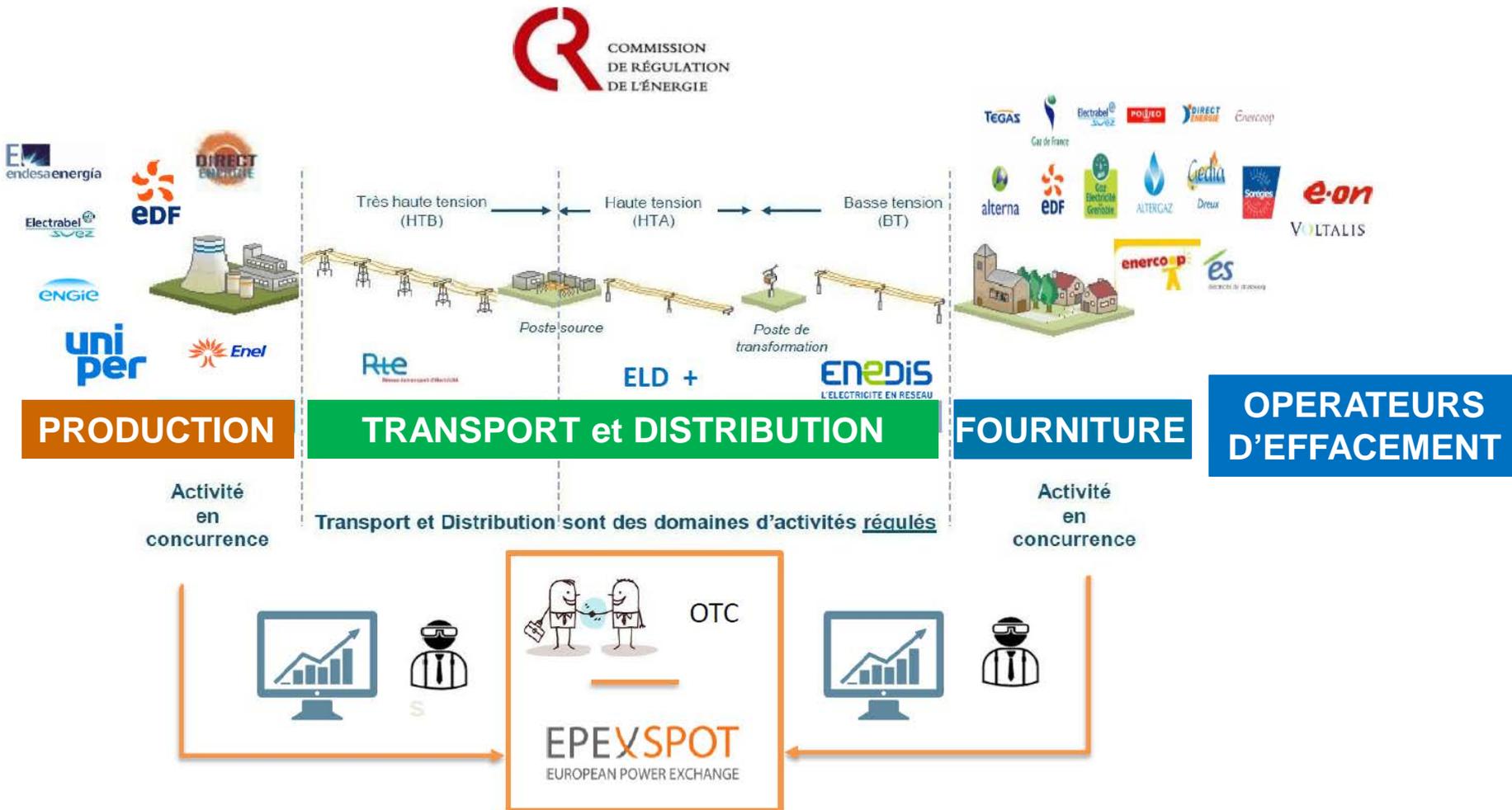
*permet à des opérateurs agréés de vendre sur le marché de l'électricité l'énergie dégagée par des effacements*

Opérateurs agréés (ou agrégateurs d'effacement) : entreprises spécialisées qui regroupent des capacités d'effacement auprès des consommateurs individuels (particuliers ou entreprises) afin de les valoriser sur le marché de capacité ou directement auprès de RTE dans le cadre de l'équilibrage des réseaux.

**2017** : Entrée en vigueur du mécanisme de capacité (loi NOME)

*mise en place des nouveaux appels d'offre effacement pour augmenter la capacité d'effacement du réseau*

# Acteurs du système électrique



(source RTE)



## *Caractérisation de l'effacement*

- Niveau de puissance effaçable
- Durée de l'effacement
- Répétitivité : fréquence par jour/semaine/hiver
- Plage horaire
- Préavis : délai de préavis nécessaire à activer l'effacement

## *Exemples de projets R&D*

**Effacement des entrepôts frigorifiques de surgelés :  
évaluation de l'impact énergétique et du risque produit**



<http://www.projetflexifroid.fr/>

*Appel à projet ADEME « Energie durable: production, gestion et utilisation efficace »*





## Contexte

Eolien, solaire : intermittence et variabilité de la production



*Effacement : outil supplémentaire de gestion et d'équilibrage du réseau*

Entrepôts frigorifiques en Europe : 70 million m<sup>3</sup>, 3.500 TWh/an (2014)

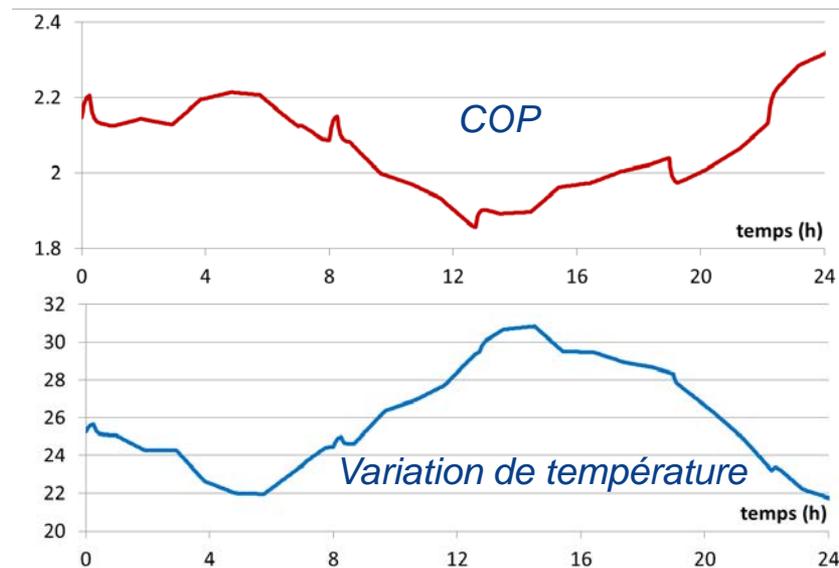


**STOCKAGE PASSIF**  
*Réseau de « batteries thermiques » disponibles*



## Impacts de l'effacement

**Verrou énergétique** : incertitude sur l'impact énergétique de périodes d'effacement  
*Variation de l'efficacité énergétique dans la journée, effets rebond/report ...*



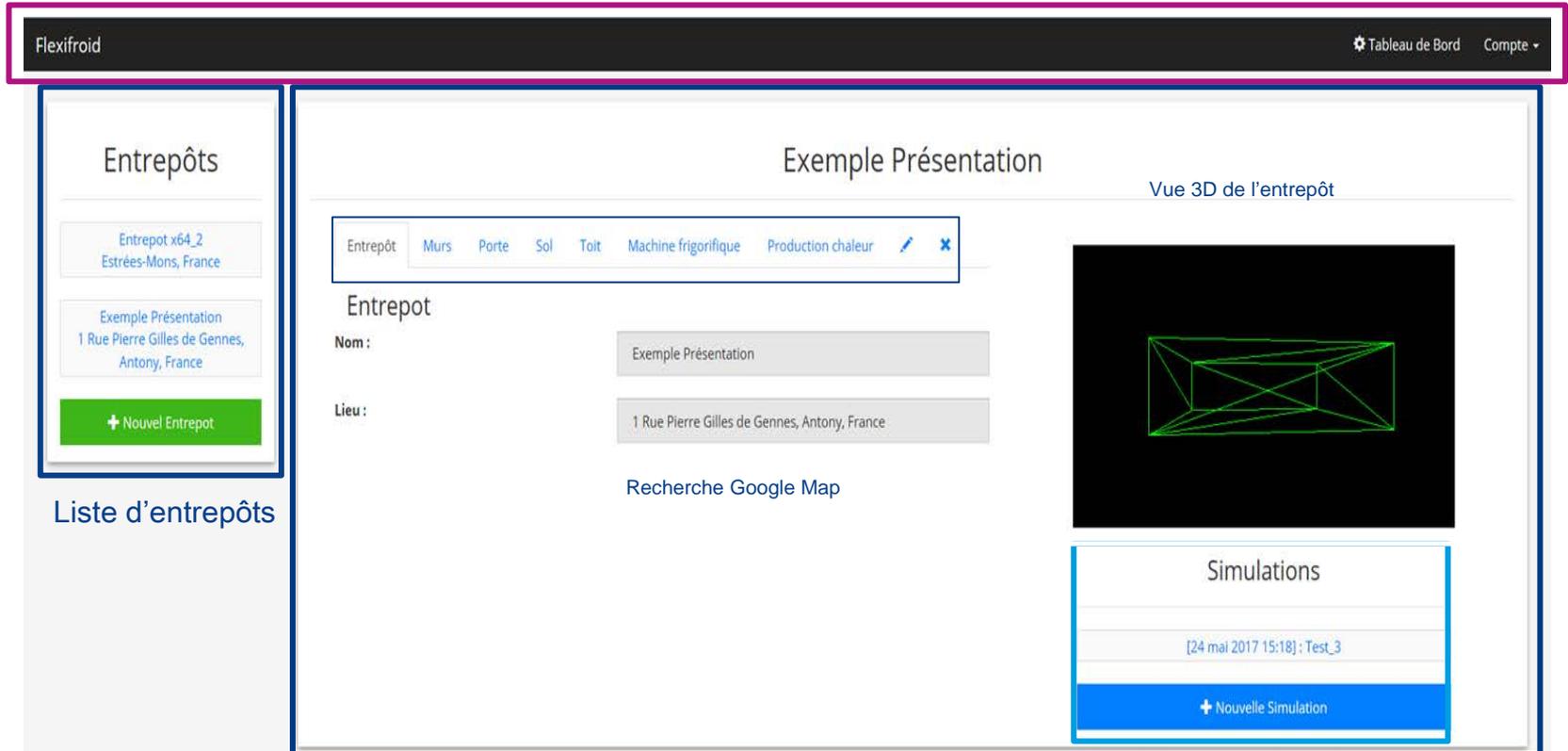
**Verrou qualité produit** : possibilité de formation de givre & dégradation de qualité due à la fluctuation de température ...

## 1 - Lever les verrous par le développement de nouvelles connaissances

- Caractérisation expérimentale *sur site / échelle labo*
  - Evolution des températures et de la qualité des produits
  - Consommation énergétique
- Modélisation pour prédire l'impact d'un effacement
  - Performance énergétique
  - Qualité des produits

## 2 - Développer un outil d'aide à la décision

- Paramètres pris en compte
  - Caractéristiques de l'entrepôt : dimensions, isolation, nature des produits stockés (haricot vert, carotte...), état de stock, ...
  - Prévisions météo
- Entrepôt non encore utilisé pour l'effacement : évaluer le *potentiel d'effacement* durée & capacité d'effacement (puissance/énergie), fluctuation maximale de température ...
- Entrepôt utilisé pour l'effacement : évaluer, en temps réel, les impacts énergétique/qualité d'une demande d'effacement et donc d'aider à la *prise de décision quotidienne*



Flexifroid

Tableau de Bord Compte

## Entrepôts

Entrepot x64\_2  
Estrées-Mons, France

Exemple Présentation  
1 Rue Pierre Gilles de Gennes,  
Antony, France

+ Nouvel Entrepot

## Exemple Présentation

Entrepôt Murs Porte Sol Toit Machine frigorifique Production chaleur

Entrepot

Nom : Exemple Présentation

Lieu : 1 Rue Pierre Gilles de Gennes, Antony, France

Recherche Google Map

Vue 3D de l'entrepôt

### Simulations

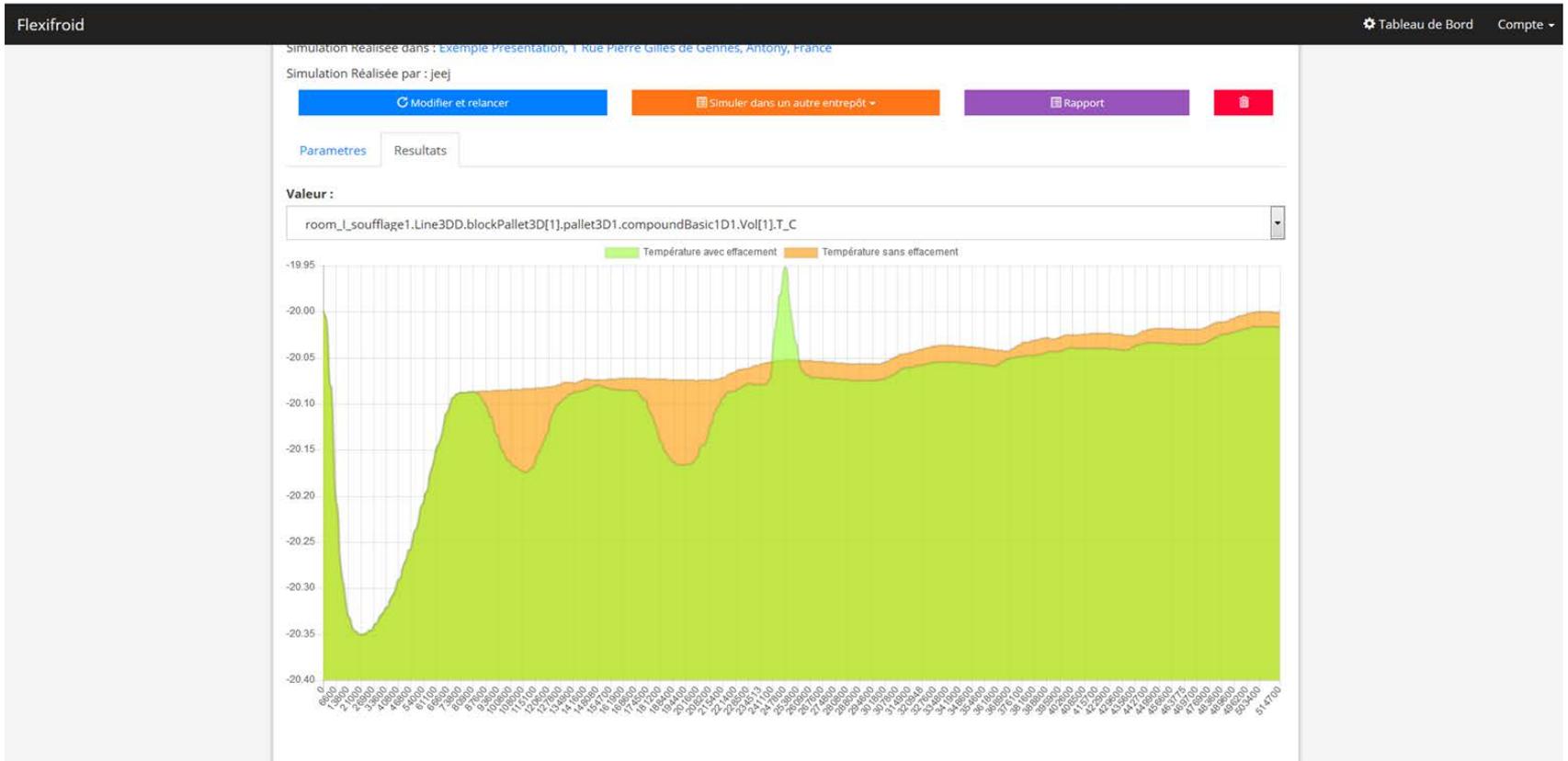
[24 mai 2017 15:18]: Test_3
-----------------------------

+ Nouvelle Simulation

Page d'un entrepôt

Liste des simulations exécutées dans cet entrepôt

Le tableau de bord est le coeur du site, il permet d'accéder à ses entrepôts et à ses simulations

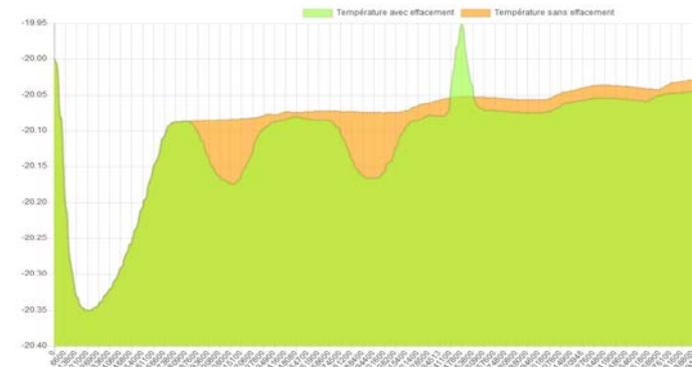
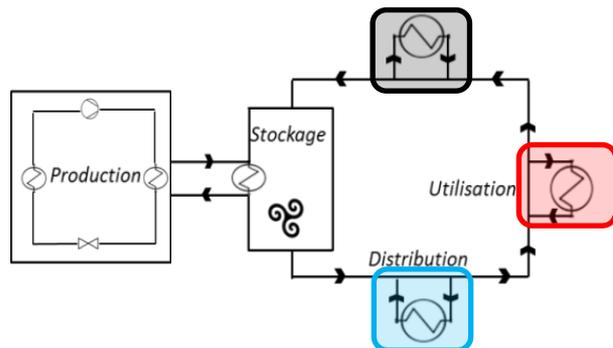


Comparaison de température avec effacement (vert) et sans effacement (orange)

# Conclusion

# Lien stockage et effacement

- Transition énergétique, développement des énergies renouvelables
  - Augmentation de demande de flexibilité du réseau
  - Solutions : Stockage & Effacement
  
- Utilisation de stockage peut faciliter le déploiement d'effacement
  
- Pistes de développement
  - Nouveaux matériaux de stockage
  - Modélisation système – outil d'aide à la décision
  - Intégration des énergies renouvelables, autoconsommation ...



# Merci pour votre attention

Anthony Delahaye et Minh Hoang, Irstea  
Unité de recherche Génie des Procédés Frigorifiques

[anthony.delahaye@irstea.fr](mailto:anthony.delahaye@irstea.fr)

[hong-minh.hoang@irstea.fr](mailto:hong-minh.hoang@irstea.fr)