

BREF HISTORIQUE DU FROID SOLAIRE A SORPTION



short history of solar cooling with sorption

M. Pons

CNRS-LIMSI, Rue J. von Neumann,

BP133, 91403 Orsay Cedex

<http://perso.limsi.fr/mpons/>



Journée SFT - Procédés Frigorifiques et Thermiques à Sorption

Pourquoi s'intéresser au froid solaire à sorption ?

- Quelques raisons évidentes :
 - Bonne adéquation *demande de froid et apports solaires*
 - Remplacement de l'électricité par une énergie disponible, gratuite
 - Sorption = technologie la plus rentable pour le froid solaire ... si on tient compte de la nécessité de stockage
- Mais surtout :
 - L'historique met en évidence une évolution de ce que « froid solaire » signifie
 - Remise en cause de quelques idées *a priori*



Plan

- Historique (incomplet) des expérimentations en froid solaire
 - > 130 ans : quatre périodes
- Bilans énergétiques
- Tendances actuelles
- Conclusions

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT - Procédés Frigorifiques et Thermiques à Sorption

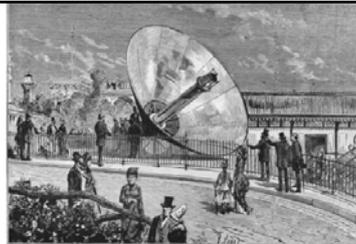


3



Du premier bloc de glace solaire

- Exposition universelle de Paris, **1878** :
Four solaire de Augustin Mouchot (1825-1912)
+ machine H₂O+NH₃ (« de Carré »)
= production de blocs de glace.



... aux tout premiers essais (avant 1960)

- **1936** : nouvelle réalisation, par Green à Univ. Florida
(cylindro-paraboliques + cycle à éjection de vapeur).
 - 1937 : essai par des chercheurs brésiliens (réussi ??)
(paraboliques + cycle à absorption).
 - **1954** : succès, par Kirpichev et Baum, Russia
(concentrateurs ? + machine Rankine + cycle à compression).
- Concentrateurs
 - très faibles rendements.

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT - Procédés Frigorifiques et Thermiques à Sorption



4



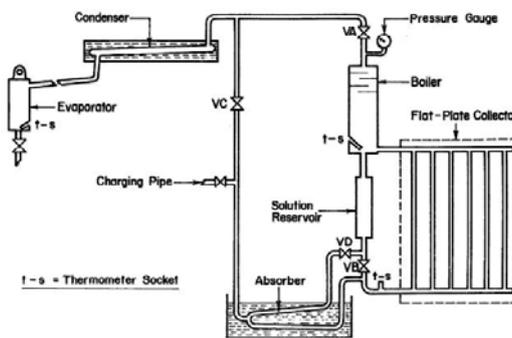
Les pionniers (années 60-70) - 1

1962 : Chinnappa
Univ. Colombo, Ceylan
capteurs plans

Cycle H₂O + NH₃ ;

cycle intermittent jour-nuit

Jour : solution H₂O+NH₃
dans les capteurs solaires ->
séparation de vapeur de NH₃
(après rectification)
-> condensation (refroidi par eau).
Nuit : évaporation de NH₃ et
réabsorption dans la solution
(refroidie par eau).



[1,4 kg glace / (j.m²)].
COP_{sol} ≈ 0.02

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT - Procédés Frigorifiques et Thermiques à Sorption



Les pionniers (années 60-70) - 2

1964 : Trombe & Foex,
CNRS-Odeillo, France ; H₂O + NH₃ ;
capteurs cylindro-paraboliques
[4 kg glace / (j.m²)].

1971 : Swartman & Swaminathan,
Univ. Western Ontario, USA ; H₂O + NH₃
capteurs plans [??]

1979 : Worsøe-Schmidt
Tech. Univ. Lyngby, DK ; CaCl₂+NH₃ ;
capteurs plans
[6 kg glace / (j.m²) ; COP_{sol} = 0.1].

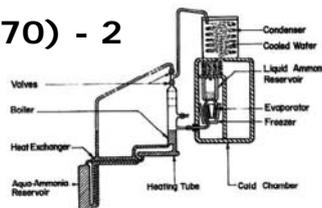
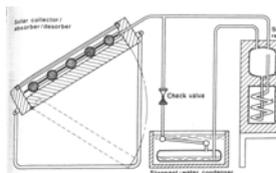
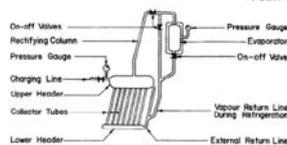


Fig 2.5 - Intermittent Absorption Refrigerator Built by TROMBE and FOEX (1964).



Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT - Procédés Frigorifiques et Thermiques à Sorption



Du laboratoire à l'industriel (années 80) - 1

- Cycles à **adsorption** solide-gaz
(zéolite + eau [Z+E]; charbon-actif + méthanol [CA+M])
intermittents jour-nuit
(production de froid pendant la nuit seulement)
- **Usages bien définis :**
réfrigérateurs / entrepôts frigorifiques / machines à glace.
- **Avec capteurs plans et plutôt autonomes**
(quasiment sans énergie électrique).

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT - Procédés Frigorifiques et Thermiques à Sorption



7



Du laboratoire à l'industriel (années 80) – 2 du CNRS-Orsay (F. Meunier) ...



1981 : réfrigérateur 0.8m² ; Z+E
 $COP_{sol} = 0.1$ (FM & JG).

1983 : entrepôt 20m² ; Z+E
 $COP_{sol} = 0.1$ (JG, FM & PhG, AC, II, MP).

1986 : machine à glace 6m² ; CA+M
 $COP = 0.12$ [5-6 kg glace / (j.m²)]
(MP, FM & FFG, PhG, AB).



Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT - Procédés Frigorifiques et Thermiques à Sorption



8



Du laboratoire à l'industriel (années 80) – 3 ... à Brissoneau et Lotz Marine (BLM)

SOLAR REFRIGERATION UNIT GASPARD C200

PERFORMANCES

- Inside effective content of isothermal enclosure : 200 l.
- Inner temperature : $\leq 4^{\circ}\text{F}$ (0°C).
- Accessory production of ice cubes.
- Conditions :
 - Maximum external temperature : 109°F (43°C) (tropical class I NF).
 - Minimum average sun exposure : 4,5 kWh/m² per day.
 - Insulation of isothermal cooler conforming with OMS specifications.



1990 : réfrigérateur ou machine à glace de 1 ou 2 m² ; Z+E ou AC+M [4-5 kg glace / (j.m²)]

BLM & CNRS-Orsay,
AB Univ. Agadir, JJG, MP & FM.



Mode d'emploi : Tourner vers le soleil ; nettoyer la vitre quand nécessaire.

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

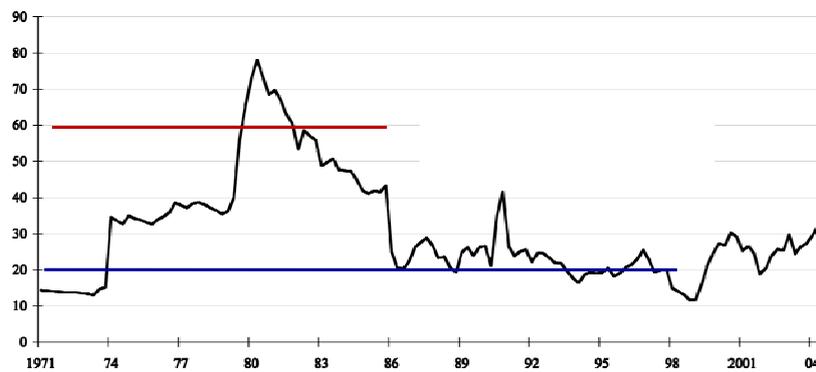
Journée SFT - Procédés Frigorifiques et Thermiques à Sorption



9

Le grand creux (années 90)

- Nombre de publications sur le froid solaire ?



Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT - Procédés Frigorifiques et Thermiques à Sorption



10

Froid solaire, le retour ! (années 2000) - 1

• Réfrigérateurs solaires à adsorption

- **HEIG-Vd¹** + **CEAS²** + **LIMS³**
 - * Prototype expérimental : $COP_{sol}=0.18$!
 - * Tentative de développement industriel (SOLAREF).



- **Institute Refrigeration Cryogenics** (Shanghai, R.Z. Wang)
 - Machine à glace ($COP_{sol}=0.12$)
 - Refroidissement silo à grains (Gel Silice + H₂O, $COP_{sol}=0.1$).



- 1: Yverdon-les-Bains CH, Ph. Dind, C. Hildbrand, S. Citherlet
- 2: Ouagadougou, Burkina-Faso
- 3 : Orsay

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT - Procédés Frigorifiques et Thermiques à Sorption



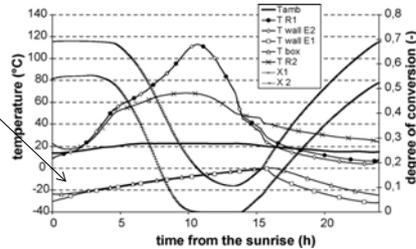
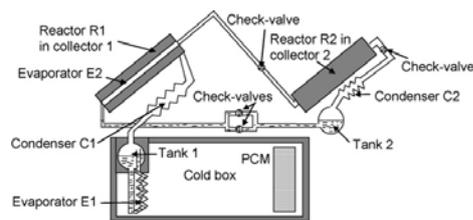
11



Froid solaire, le retour ! (années 2000) - 2

• Congélateur solaire à thermochimie

- **PROMES** (N. Le Pierrès, N. Mazet, D. Stitou, 2008)
 - BaCl₂ + NH₃, cycle double étage intermittent, T_{evap} -> -20°C.
- Aussi **ITW Univ. Stuttgart** (Erhard, 1998) :
 - Capteur à concentration + SrCl₂ + NH₃, intermittent ($COP_{sol}=0.07$).



Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT - Procédés Frigorifiques et Thermiques à Sorption



12



Froid solaire, le retour ! (années 2000) – 3

D'autres objectifs, d'autres techniques

- Jusque 2000, machines conçues pour **refrigération** (conservation aliments ou vaccins en l'absence de fourniture électrique fiable) et qui **forment un tout** (p.ex. sorbant -liquide ou solide- chauffé directement dans capteur solaire).
- Après 2000, machines pour la **climatisation solaire**, afin de diminuer l'effet « îlot de chaleur urbain » et de substituer, au moins partiellement, une source renouvelable à l'électricité. Ces machines vont pouvoir utiliser des **composants existants par ailleurs**.

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT - Procédés Frigorifiques et Thermiques à Sorption

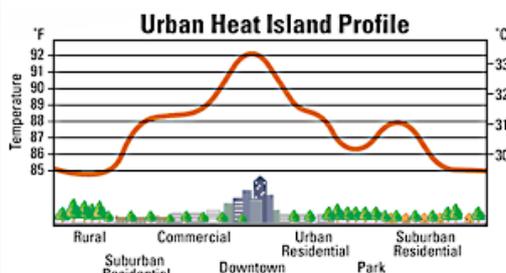


13



Les îlots de chaleur urbains

- Entre un centre-ville et sa périphérie, il existe une **différence systématique de quelques degrés Celsius**.
 - Cause : l'énergie dégagée par l'activité humaine.
- En été, le phénomène « d'**îlot de chaleur urbain** », a une très forte interaction avec l'usage croissant de la climatisation (cf. USA, Athènes, ...).



Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

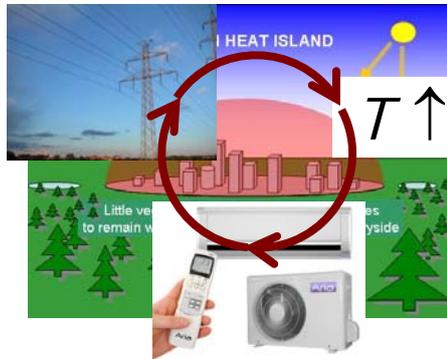
Journée SFT - Procédés Frigorifiques et Thermiques à Sorption



14



Le cercle vicieux de la climatisation



ΔT entre extérieur et intérieur (climatisé) ↗

Deux conséquences :

- 1. Apports chaleur plus importants :

puissance des climatiseurs ↗

- 2. ($T_{\text{condenseur}}$ - $T_{\text{évaporateur}}$) ↗

COP ↘

- Consommation électrique ↗ ↗

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT - Procédés Frigorifiques et Thermiques à Sorption



15



Solutions

- Diminuer les besoins en climatisation active (ventilation nocturne, toitures vertes, etc.)
- Faire fonctionner les climatiseurs avec de **l'énergie déjà présente en ville** : rejets thermiques si possible

ou énergie solaire.

Substituer le soleil à l'électricité



Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT - Procédés Frigorifiques et Thermiques à Sorption



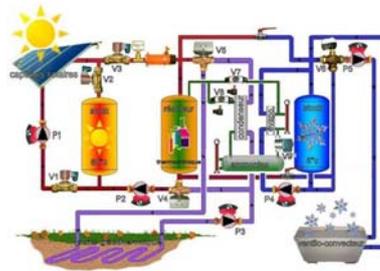
16



Froid solaire, le retour ! (années 2000) - 4

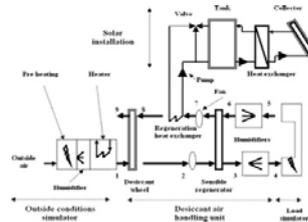
- **Sorption solide - Thermochimie**

- **PROMES** (G. Tanguy, N. Mazet & D. Stitou)
BaCl₂-NH₃, intermittent,
Stock froid (PCM à 5°C),
 $COP_{sol} = 0.085$; $0.43 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$.
- Capteurs solaires du commerce +
machine frigorifique expérimentale



- **Adsorption (cycle dessiccant ou fermé)**

- **LEPTIAB Univ. La Rochelle** (P. Bourdoukan, E. Wurtz, P. Joubert) $COP_{sol} = 0.13$ (= 0.5×0.4)
 $COP_{el} = 3.6$ Consommation d'eau = 4.5 l/kWh_{fd}
- **TECSOL** (A. Le Denn) Gel de silice-eau, intermittent,
 $COP_{sol} = 0.09$; $0.50 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$.



Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT - Procédés Frigorifiques et Thermiques à Sorption



17



Froid solaire, le retour ! (années 2000) - 5

- **Sorption liquide**

- **PIMENT** (F. Lucas, O. Marc)
LiBr-H₂O, continu,
Stock froid (Eau),
 $COP_{sol} = 0.17$; $0.77 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$.
- **CEA-INES** (F. Boudehenn, G. Tanguy)
LiBr-H₂O, continu,
 $COP_{sol} = 0.11$; $0.55 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$.



- *Note : Valeurs données pour Promes, Tecsol, Leptiab, Piment et Cea-Ines = moyennes expérimentales réalisées sur de longues périodes (> 1 mois).*

- **Assemblage de composants du commerce :**
capteurs solaires et de machines à sorption

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT - Procédés Frigorifiques et Thermiques à Sorption



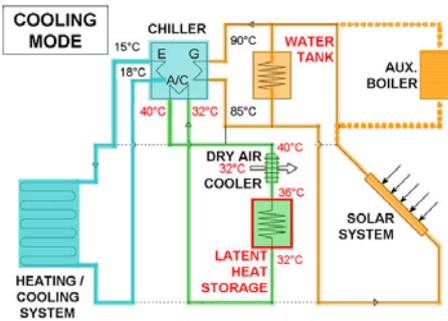
18



Froid solaire, le retour ! (années 2000) - 6

• À l'étranger

- **ZAE-Bayern** (C. Schweigler et al.)
LiBr-H₂O, continu,
Stock PCM entre rejets et air
extérieur pour améliorer le COP et
diminuer consommation électrique,
pas de *COP_{sol}* donné.



- *Autres réalisations à T.U.Berlin ou Fraunhofer en Allemagne, et aussi en Espagne (Séville), en Chine, à Taiwan, en Autriche, en Italie ...*

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT - Procédés Frigorifiques et Thermiques à Sorption

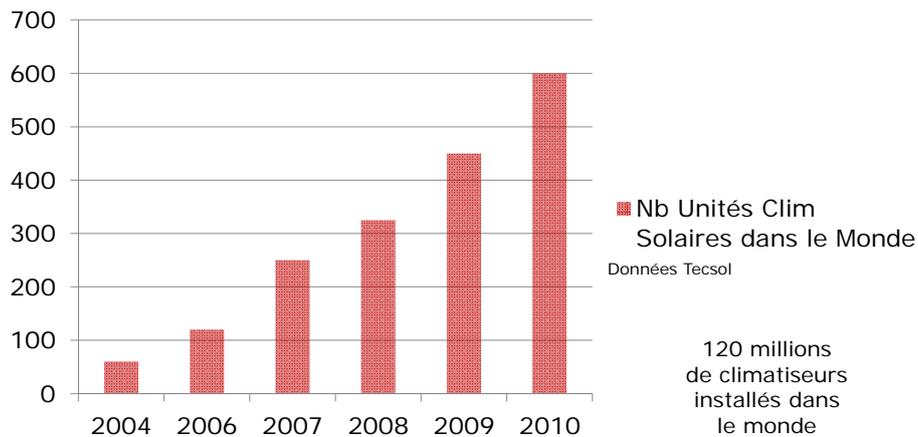


19



Un marché émergent

Nb Unités Clim Solaires dans le Monde



Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT - Procédés Frigorifiques et Thermiques à Sorption



20



Plan

- Historique (incomplet) des expérimentations en froid solaire
 - > 130 ans : quatre périodes
- **Bilans énergétiques**
 - Tendances actuelles
 - Conclusions

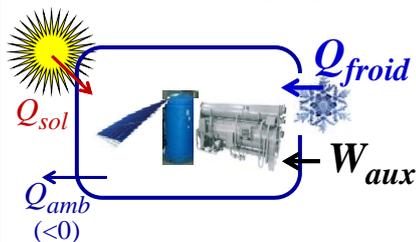
Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT - Procédés Frigorifiques et Thermiques à Sorption

21



Ne pas négliger la consommation électrique



Rapport Froid produit
sur
Consommation
électrique totale
(auxiliaires)

$$COP_{el} = \frac{Q_{froid}}{W_{aux}}$$

Expériences climatisations solaires ORASOL :

- PIMENT, 90 m² capteurs plans 2-Vitr ; LiBr+H₂O, COP_{el} = 2.5 ;
- PROMES, 22 m² capteurs plans 1-Vitr ; BaCl₂+NH₃, COP_{el} = 7 ;
(autres valeurs : 4, 5, et ... 2)

Intégration sur un temps suffisant.

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT - Procédés Frigorifiques et Thermiques à Sorption

22



Le froid solaire n'annule pas la consommation d'électricité

- Pour climatisation à compression COP_{el} d'environ 3.
- Une valeur de 7 pour le COP_{el} représente une économie d'électricité intéressante (env. 50 %) mais pas totale.
- Des contre-performances sont possibles : certaines expérimentations solaires consomment plus d'électricité qu'un climatiseur à compression.

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT - Procédés Frigorifiques et Thermiques à Sorption



23



La cause première de consommation électrique le rejet de chaleur à l'air extérieur

- Tour de refroidissement sur le toit du bâtiment, sèche ou humide, avec ou sans ventilateur,

...

- **Rejets de chaleur** condenseur et absorbeur :

Pour réduire les ΔT et augmenter le COP de l'unité :

- 1/ faire circuler un **fort débit de fluide caloporteur** (eau) entre unité de froid et la tour ;
- 2/ actionner un **ventilateur** pour assurer une convection forcée d'air extérieur.



- **Peut s'avérer une cause de forte consommation des auxiliaires.**
 - Autre cause : circulation fluide dans les capteurs solaires

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

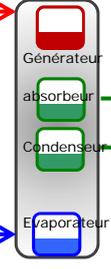
Journée SFT - Procédés Frigorifiques et Thermiques à Sorption



24



Influence de l'efficacité de l'unité de froid



- $COP_{unit} : Q_{evap} / Q_{chauf}$.

Aux dissipations près on a :

$$-Q_{rej} = Q_{evap} \left(1 + \frac{1}{COP_{unit}} \right)$$

- Machine à compression : $COP_{unit} \approx 3 \rightarrow -Q_{rej} \approx 1.3 \times Q_{evap}$
- Machine à absorption simple-effet : $COP_{unit} \approx 0.7 \rightarrow -Q_{rej} \approx 2.4 \times Q_{evap}$
- Machine à absorption double-effet : $COP_{unit} \approx 1.2 \rightarrow -Q_{rej} \approx 1.8 \times Q_{evap}$

- Le COP_{unit} a une influence directe sur le flux à rejeter, et donc sur débit de fluide caloporteur et écarts de température et surface d'échange, et donc sur consommation des auxiliaires.

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT - Procédés Frigorifiques et Thermiques à Sorption

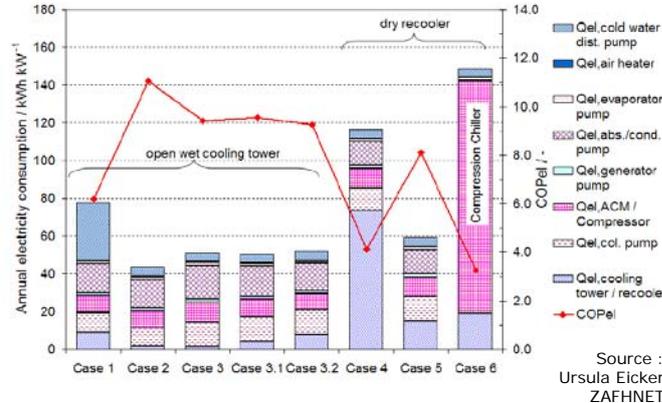


25



Influence des technologies sur le COP_{el}

- Une bonne technologie de tour de refroidissement et une bonne stratégie de contrôle pour augmenter le COP_{el} .
- Autres pistes : rejets nocturnes (ZAE Bayern) OU transferts directs (Lizarte et al. 2013) OU rejets vers le sol (quand possible)



Source : Ursula Eicker ZAFHNET

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT - Procédés Frigorifiques et Thermiques à Sorption



26



Autres éléments de réflexion pour diminuer la consommation électrique

- Utiliser le refroidissement par échangeur enterré.
- Utiliser l'aide du refroidissement nocturne (cf. ZAE-Bayern)
- Utiliser les différences entre cycles intermittents et cycle continu
 - Cycles Intermittents = rejets de chaleur sur période plus longue (Condensation le jour et ab/ad-sorption la nuit).
 - Cycles continus = rejets de chaleur sur période plus courte (Condensation ET ab/ad-sorption le jour).
- Favoriser les transferts directs (réduire le nombre de boucles de transferts), voire utiliser des caloducs, ...

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT - Procédés Frigorifiques et Thermiques à Sorption



27



Plan

- Historique (incomplet) des expérimentations en froid solaire
 - > 130 ans : quatre périodes
- Bilans énergétiques
- **Tendances actuelles**
 - Conclusions

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT - Procédés Frigorifiques et Thermiques à Sorption



28



Croître, croître, croître

- Augmenter la **taille du champ de capteurs** et utiliser la concentration optique (Fresnel, Parabolique)
 - Capteurs plus efficaces
- Augmenter la **température du fluide** à la sortie de capteurs
- Augmenter la **puissance des unités de froid**
 - -> Augmenter le nombre d'effets et donc le *COP_{unit}*.

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT - Procédés Frigorifiques et Thermiques à Sorption



29



Des projets de plus en plus grands

- Associant capteurs à concentration et unités de froid à haut COP



CGD Bank Headquarter

Lisbon, Portugal

1560 m² collector area
400 kW absorption chiller

Source: SOLID, Graz/Austria



FESTO Factory

Berkheim, Germany

1218 m² collector area
1.05 MW (3 adsorption chillers)

Source: Paradigma, Festo



United World College (UWC)

Singapore

3900 m² collector area
1.47 MW absorption chiller

Source: SOLID, Graz/Austria

Source :
Daniel Mugnier
TECSOL

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT - Procédés Frigorifiques et Thermiques à Sorption

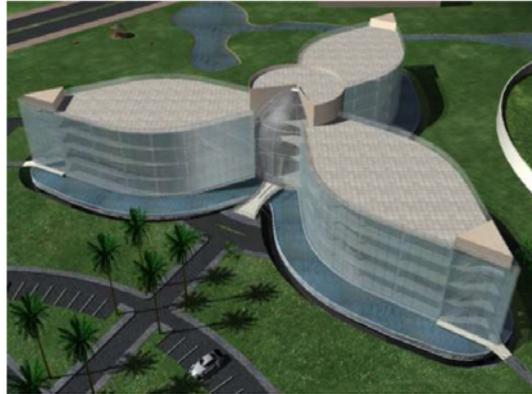


30



Voire pharaoniques

- Mais en soignant la consommation énergétique :
800 kW « seulement » de puissance froid.



Cairo office building
15100 m² surface
52 W/m² cooling load
130 kWh/m² cooling
energy demand

Source :
Ursula Eicker
ZAFH

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT - Procédés Frigorifiques et Thermiques à Sorption



31



Autres tendances des réalisations actuelles

- Le **fonctionnement hybride** (soleil + ...) est préféré à un fonctionnement autonome en solaire seul :
fraction solaire de l'ordre de 0,5.
 - **Investissement** (2012)
entre 5000 € / kW froid (pour les petites unités)
et 2500 € / kW froid (pour les grandes) ;
autres estimations : avec un facteur 1,5-2.

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT - Procédés Frigorifiques et Thermiques à Sorption



32



Conclusions

- La climatisation solaire se développe.
 - Recherche de systèmes efficaces, p.ex. en utilisant augmentant la puissance, les températures, ou en optimisant le contrôle.
- Diminution de la consommation électrique effective.
 - Le problème est plus complexe qu'à première vue, et reste encore du ressort de la recherche, en thermique-énergétique comme en mathématiques appliquées.

- **Merci de votre attention**

et de vos questions