

Analyse énergétique et exergetique d'un appareil multifonctions de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire.

Jean-Pierre Bédécarrats, Jean Castaing-Lasvignottes,
Stéphane Gibout, Tarik Kousksou

**Les outils de la Thermodynamique des Fluides et de la
Thermodynamique Energétique pour un procédé optimisé**

**Journée « Energie et Thermodynamique » SFGP-SFT
6 janvier 2011, Nancy**

Un appareil multifonctions permet d'assurer les fonctions :

- **Ventilation**,
- **Chauffage**,
- **Production d'eau chaude sanitaire (ECS)**,
- **Refroidissement**.

Objectifs

- Appréhender les performances de l'installation en combinant :
 - **Une modélisation complète reposant sur la thermodynamique (bilans énergétiques et exergetiques)**
 - **Une analyse thermo-économique où les coûts (de fonctionnement et d'équipement) entrent en jeu**
- Montrer la mise en œuvre et l'intérêt de l'analyse thermoéconomique en milieu industriel

Analyse des systèmes énergétiques

Étude **technico-économique**



**Premier principe de la
thermodynamique**



Quantité d'énergie

Étude énergétique

Ne s'intéresse pas à la dégradation d'énergie

Étude **thermo-économique**



**Premier et deuxième
principe de la
thermodynamique**



**Quantité et qualité
d'énergie**

Étude exergetique

Evalue les irréversibilités

Équations générales utilisées

$$\frac{dU_i}{dt} = \sum_j \dot{Q}_{ij} + \dot{W}_i + \sum_e \dot{m}_i^e h_i^e - \sum_s \dot{m}_i^s h_i^s$$

- U_i Energie interne du milieu i [J],
 \dot{Q}_{ij} Flux d'énergie thermique échangé entre les milieux i et j [W],
 \dot{W}_i Flux d'énergie mécanique du milieu i [W].
 \dot{m}_i^e, \dot{m}_i^s Débit masse de fluide entrant et sortant [kg/s],
 h_i^e, h_i^s Enthalpies spécifiques du fluide entrant et sortant [J/kg].

$$\frac{dS_i}{dt} = \sum_j \frac{\dot{Q}_{ij}}{T_j} + \sum_e \dot{m}_i^e s_i^e - \sum_s \dot{m}_i^s s_i^s + \dot{\sigma}$$

- S_i Entropie du milieu i [J K⁻¹],
 \dot{Q}_{ij} Flux de chaleur échangé avec un milieu à température T_j [W],
 s_i^e, s_i^s Entropies massiques du fluide entrant et sortant [J kg⁻¹ K⁻¹],
 $\dot{\sigma}$ Production d'entropie [W.K⁻¹]

Équations générales utilisées

$$\frac{dEx_i}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_{ij} + \dot{W}_i + \sum_e \dot{m}_i^e ex_i^e - \sum_s \dot{m}_i^s ex_i^s - T_0 \dot{\sigma}$$

$$Ex = U - T_0 S$$

$$ex = h - T_0 s$$

Ex_i Exergie du milieu i [J]

T_0 Température du milieu ambiant [K],

ex_i^e, ex_i^s Exergies massiques du fluide entrant et sortant [$J \text{ kg}^{-1}$]

L'exergie peut se définir comme la quantité maximale d'énergie d'un système récupérable sous forme de travail, dans un processus réversible d'échange à température ambiante

Pour réaliser une étude thermo-économique

Modèle Thermodynamique

**Energétique et
exergétique
(Simulateur)**

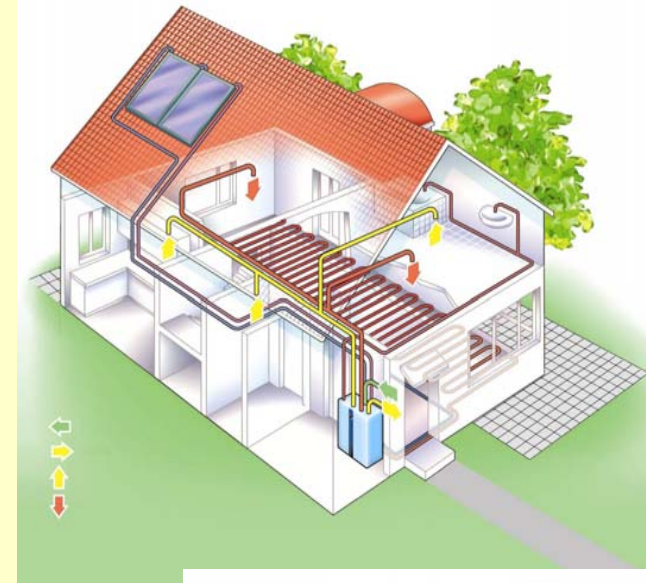
**Modèle Économique
(Coûts, données
économiques,...)**

Rôle de chaque composant (produits et ressources)

Schéma thermo-économique

BESOINS

- ECS
- Ventilation
- Chauffage



MOYENS

- PAC
- Double flux
- Plancher chauffant
- Ventilateurs
- Pompes

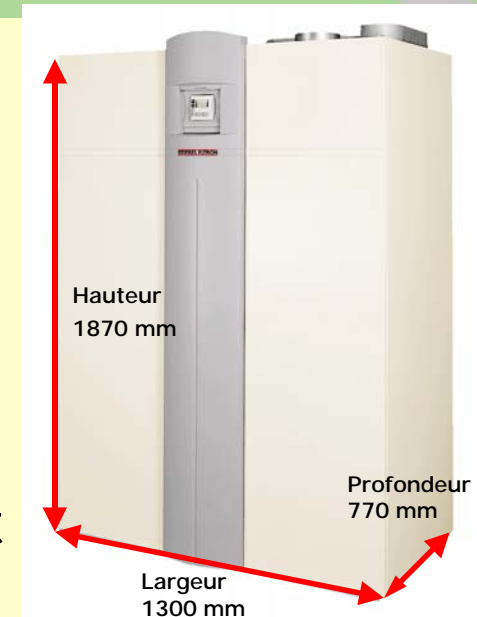
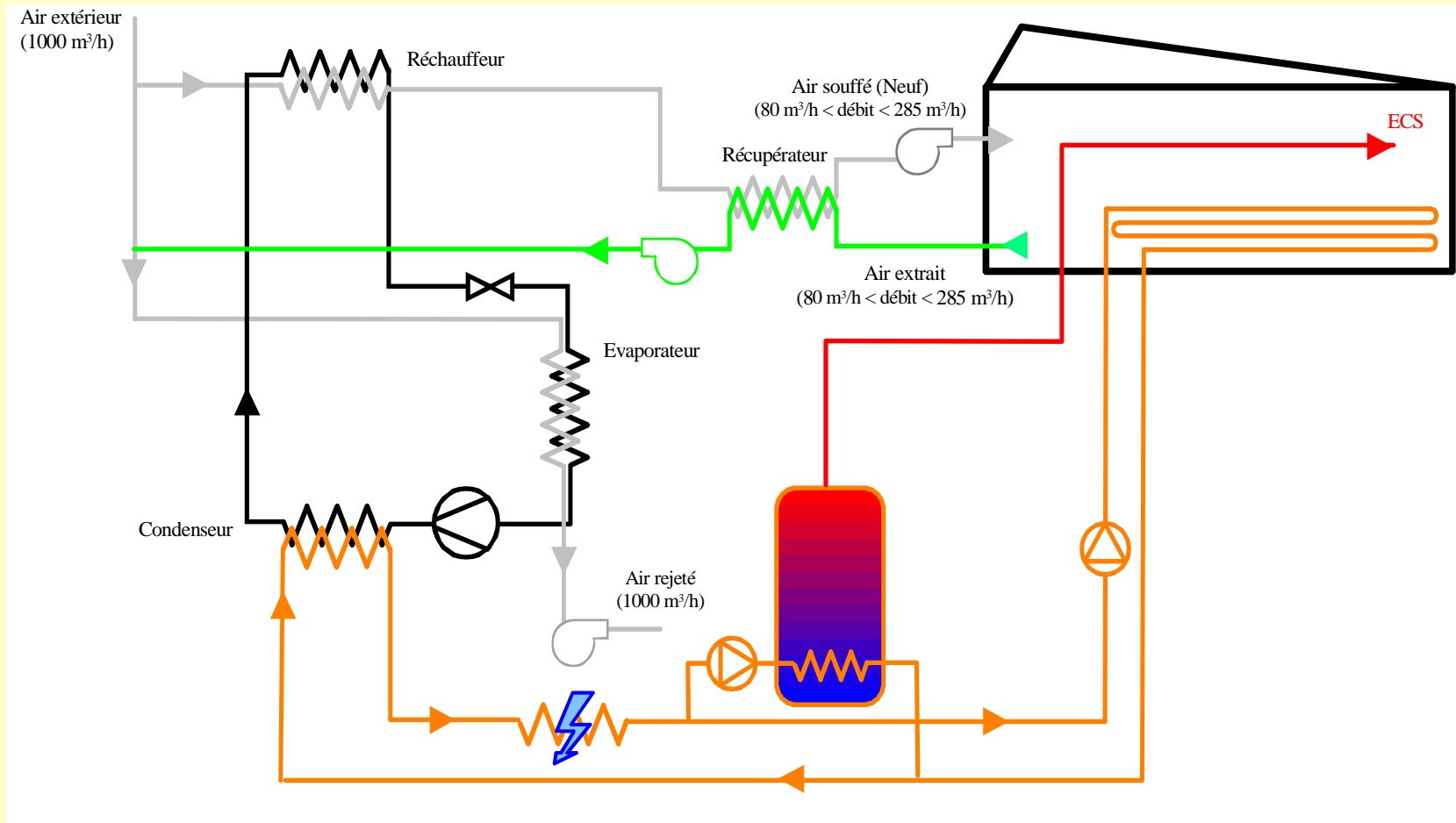


Schéma complet de l'installation



préchauffage de l'air neuf, alimentation
d'un plancher chauffant et production
d'eau chaude sanitaire (ECS)

**Fonctionnement
Hiver**

Air : 10 localisations (température sèche T_s , température humide T_h , température de rosée T_r , enthalpie massique h , humidité spécifique w , humidité relative f , volume massique v et entropie massique s)

R407C : 6 points (P,T, h, s)

Eau : 6 points (T, h, s)

Consommations électriques :

3 ventilateurs, 2 pompes, un compresseur, une résistance

Flux de chaleur:

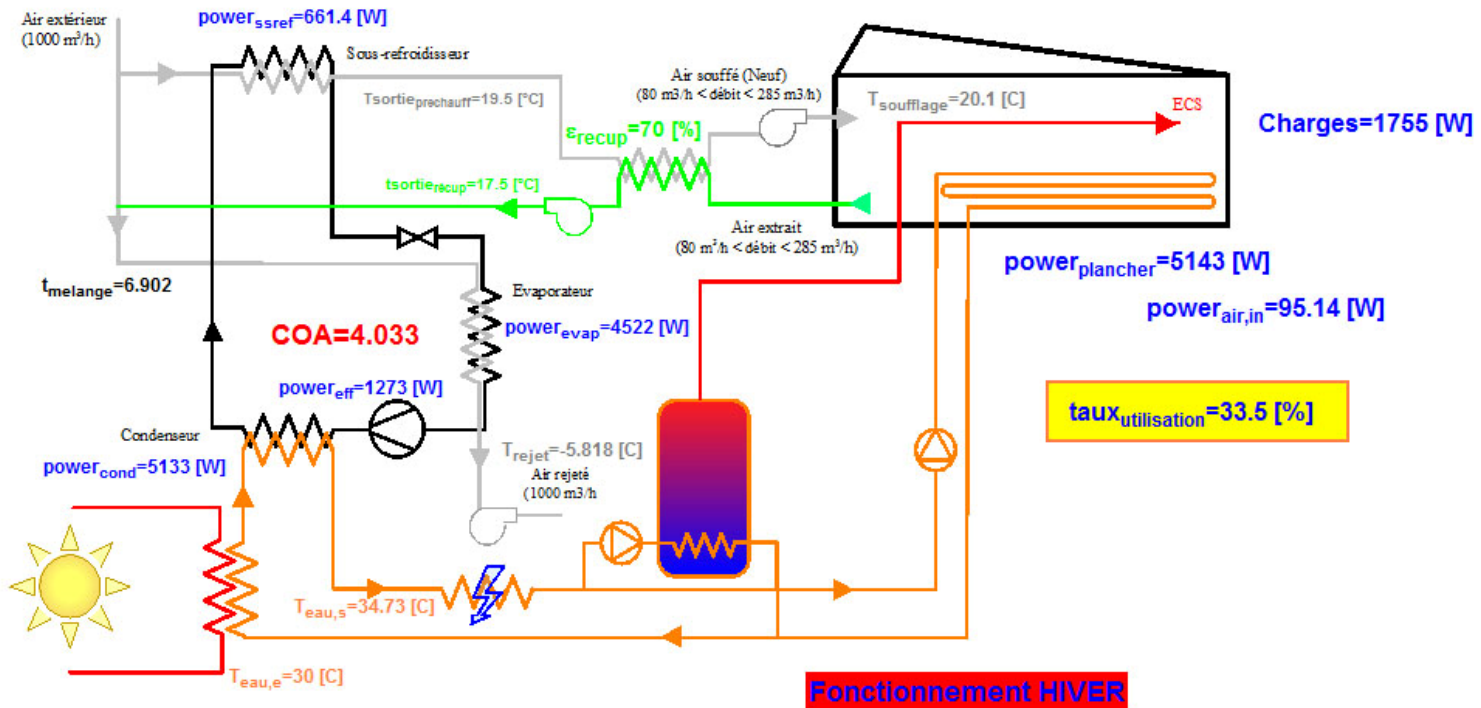
condenseur, évaporateur , réchauffeur, récupérateur, plancher, ECS

5 climats

Une année = 8760 heures

(Rennes, Nantes, Nancy, Nice et Macon)

| Conditions extérieures | |
|---|--|
| $T_{s_{ext}}=5$ [°C] | |
| $Th_{ext}=0$ [°C] | |
| $\phi_{ext}=37.08$ [%] | |
| $w_{ext}=0.001993$ | |
| $V_{ext}=0.7905$ [m ³ /kg] | |
| Conditions intérieures | |
| $T_{s_{int}}=18$ [°C] | |
| Efficacité récupérateur | |
| $\epsilon_{recup}=70$ [%] | |
| Débit entrée | |
| $debitvol_{ext}=1000$ [m ³ /h] | |
| $debitmass_{ext}=0.333$ [kg/s] | |
| $power_{ventil}=148$ [W] | |
| $eff_{prechauff}=50$ | |
| $rend_{ventil}=50$ [%] | |



Calculate

$P_{cond}=1500644$ [Pa]

$P_{evap}=432441$ [Pa]

$T_{cond}=34.1$ [°C]

$T_{evap}=-8.098$ [°C]

$deb_{ff}=0.03547$ [kg/s]

$firstlaw=0.000002886$

CONSO elec (W)

Conso_{comp}=1273 [W]

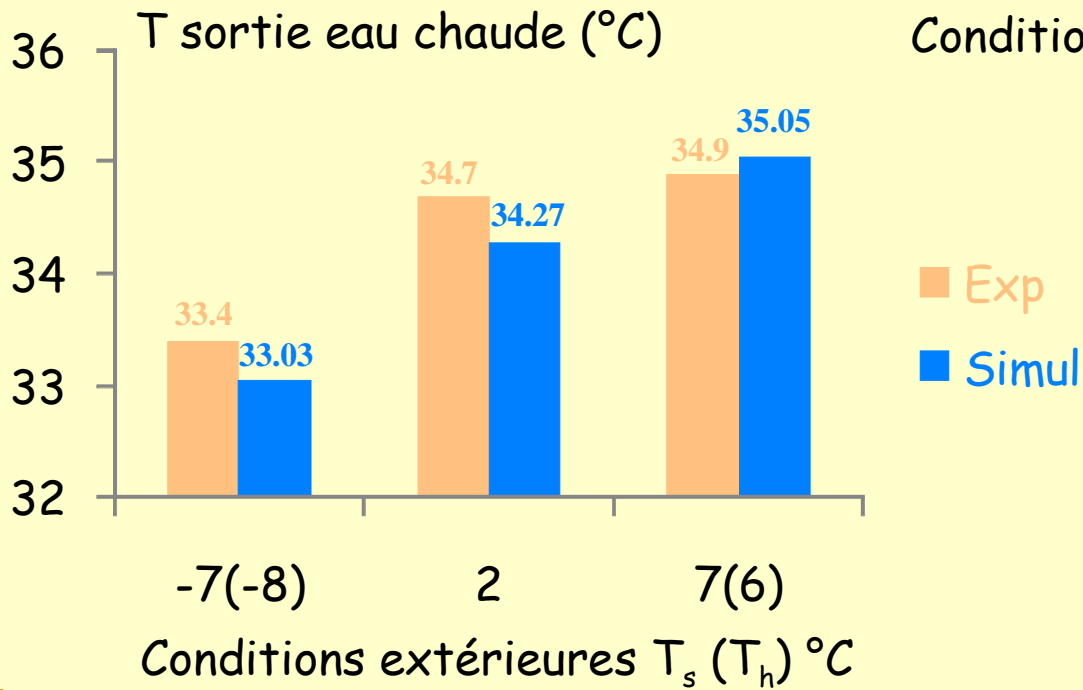
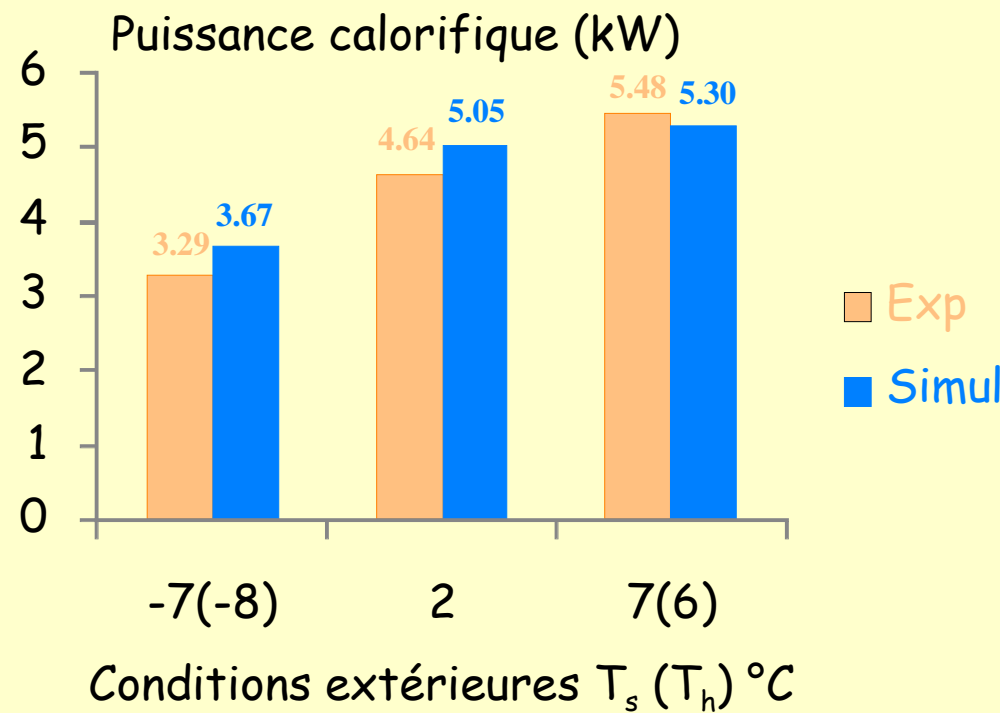
Conso_{Vsouff}=148 [W]

Conso_{Vrécup}=148 [W]

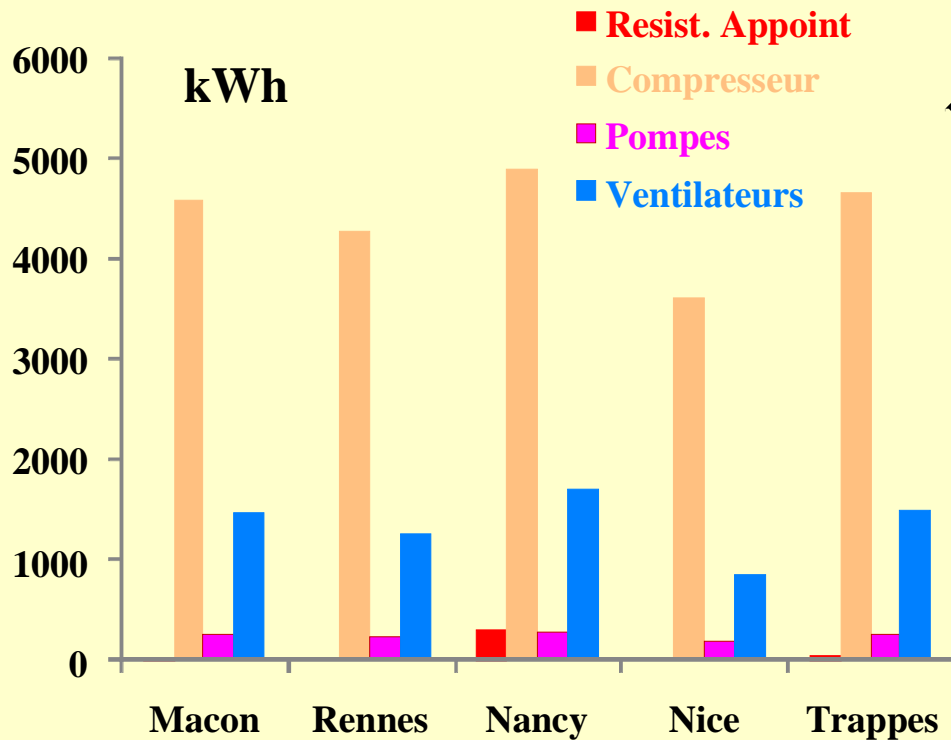
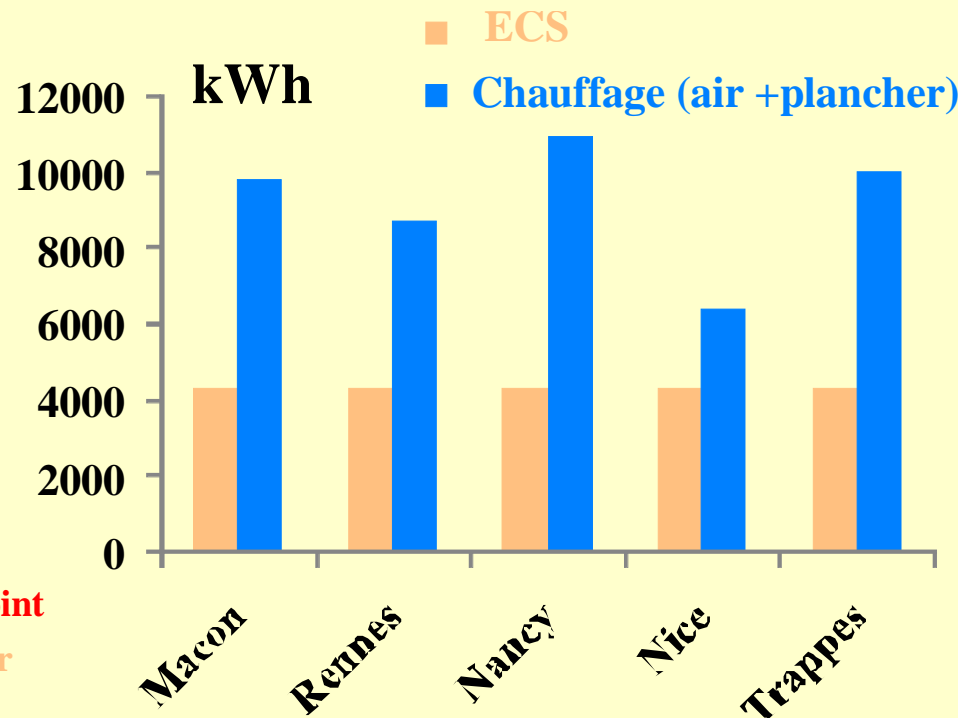
Conso_{Vextrac}=300 [W]

Conso_{pompe}=64 [W]

Validation du modèle

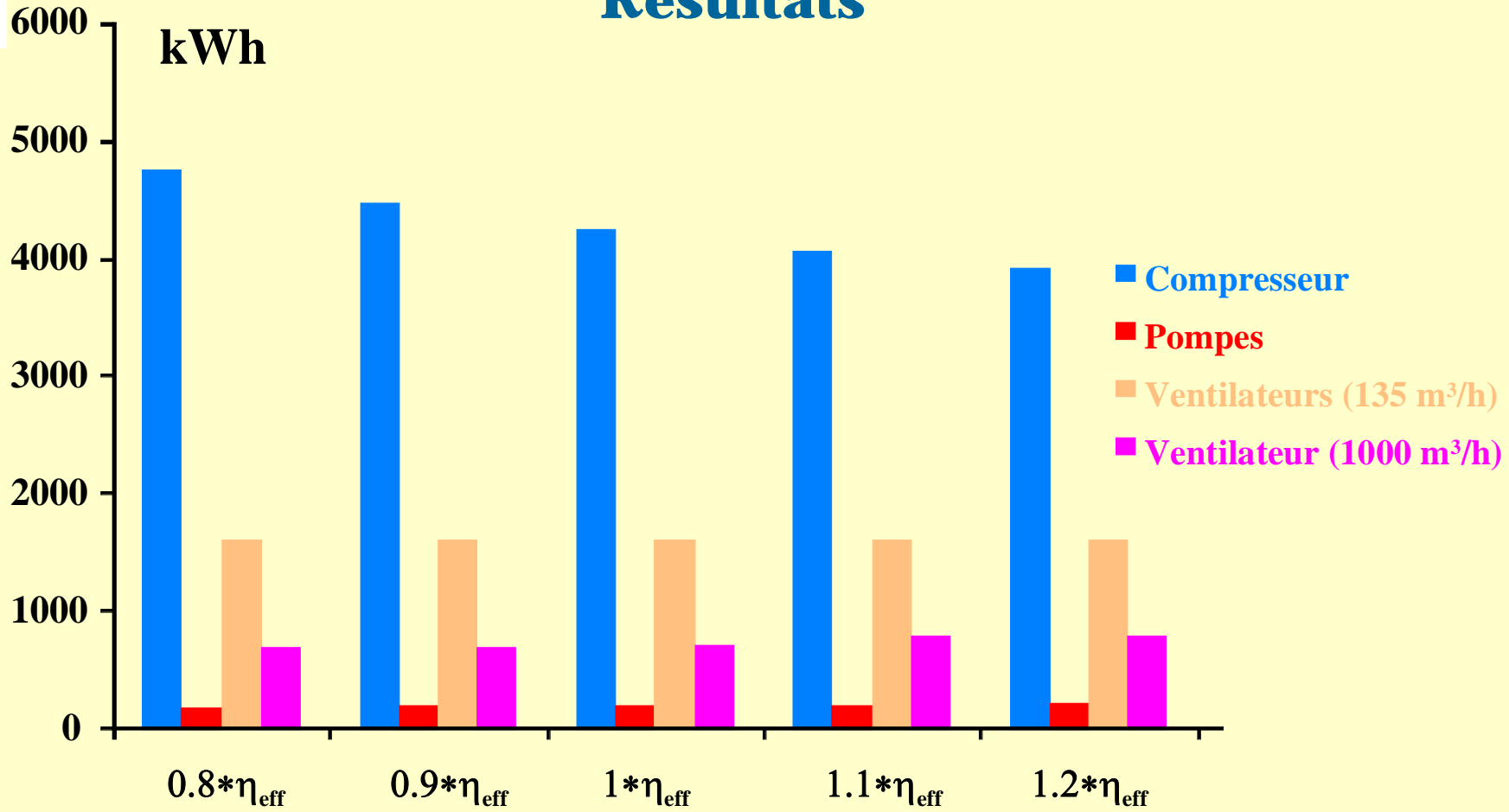


Résultats



Charges énergétiques et consommations correspondantes annuelles pour les cinq climats envisagés.

Résultats

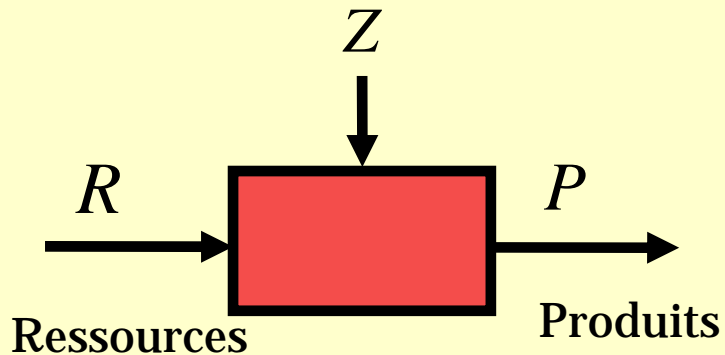


Influence des performances du compresseur sur les énergies consommées annuellement par l'appareil multifonctions pour le climat de Rennes

Schéma thermoéconomique : structure productive

- Une structure productive est un graphe permettant de représenter les produits ou consommations d'exergie des différentes unités d'un système énergétique.
- Établissement de la structure productive

Coûts d'investissement



Flux exergetiques

$$R = P + I$$

$$I = R - P$$

R = Ressources

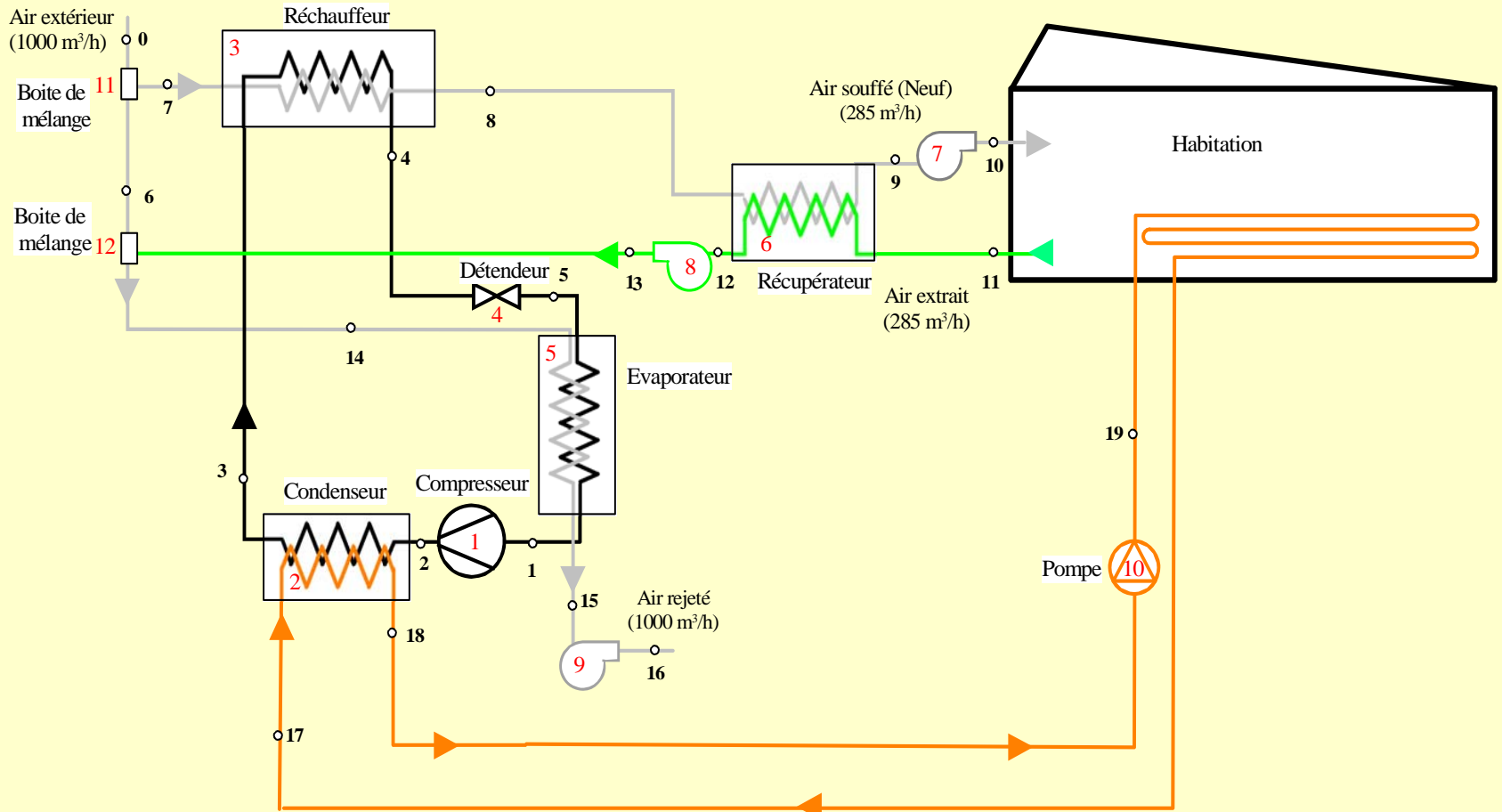
P = Produits

I = Irréversibilités
(destruction des flux
exergetiques)

$$k = \frac{R}{P} = 1 + \frac{I}{P}$$

k = consommation (ou
coût) exergetique unitaire

Schéma physique de l'installation



Fonctionnement Hiver

| N° | Composant | Rôle | Ressource exergetique (en kW) | Produit exergetique (en kW) |
|-------|-------------------------|--|--|--|
| 1 | Compresseur | Comprimer le Fluide Frigorigène (FF) | Travail du compresseur $R_1 = W_{cp}$ | Variation d'exergie fournie au fluide frigorigène $P_1 = Ex_2 - Ex_1$ |
| 2 | Condenseur | Chauffer le circuit d'eau | Variation d'exergie fournie au Fluide frigorigène $R_2 = Ex_2 - Ex_3$ | Variation d'exergie fournie à l'eau $P_2 = Ex_{18} - Ex_{17}$ |
| 3 | Réchauffeur | Eviter le givrage de l'air | Variation d'exergie fournie au Fluide frigorigène $R_3 = Ex_3 - Ex_4$ | Variation d'exergie fournie à l'air $P_3 = Ex_8 - Ex_7$ |
| 4 | Détendeur | Détendre le FF | Exergie à l'entrée $R_4 = Ex_4$ | Exergie à la sortie $P_4 = Ex_5$ |
| 5 | Évaporateur | Évaporer le FF | Variation d'exergie de l'air + exergie du FF à l'entrée. $R_5 = Ex_{14} - Ex_{15} + Ex_5$ | Flux d'exergie du FF à la sortie $P_5 = Ex_1$ |
| 6 | Récupérateur | Réchauffer l'air soufflé | Variation d'exergie de l'air extrait $R_6 = Ex_{11} - Ex_{12}$ | Variation d'exergie de l'air soufflé $P_6 = Ex_9 - Ex_8$ |
| 7 | Ventilateur air soufflé | Faire circuler l'air | Travail électrique $R_7 = W_7$ | Variation d'exergie de l'air $P_7 = Ex_{10} - Ex_9$ |
| 8 | Ventilateur air extrait | Faire circuler l'air | Travail électrique $R_8 = W_8$ | Variation d'exergie de l'air $P_8 = Ex_{13} - Ex_{12}$ |
| 9 | Ventilateur air rejeté | Faire circuler l'air | Travail électrique $R_9 = W_9$ | Variation d'exergie de l'air $P_9 = Ex_{16} - Ex_{15}$ |
| 10 | Pompe | Faire circuler l'eau pour chauffer le plancher | Travail électrique $R_{10} = W_{10}$ | Variation d'exergie de l'eau $P_{10} = Ex_{19} - Ex_{18}$ |
| 11 | Séparateur | | $R_{11} = Ex_0$ | $P_{11} = Ex_6 + Ex_7$ |
| 12 | Boite de mélange | | $R_{12} = Ex_6 + Ex_{13}$ | $P_{12} = Ex_{14}$ |
| TOTAL | | | $Ex_0 + W_{cp} + W_7 + W_8 + W_9 + W_{10}$ | $Ex_{10} - Ex_{11} + Ex_{19} - Ex_{17} + Ex_{16}$ |

| N° | Composant | Rôle | Ressource exergetique (en kW) | Produit exergetique (en kW) |
|-------|-------------------------|--|--|--|
| 1 | Compresseur | Comprimer le Fluide Frigorigène (FF) | Travail du compresseur $R_1 = W_{cp}$ | Variation d'exergie fournie au fluide frigorigène $P_1 = Ex_2 - Ex_1$ |
| 2 | Condenseur | Chauffer le circuit d'eau | Variation d'exergie fournie au Fluide frigorigène $R_2 = Ex_2 - Ex_3$ | Variation d'exergie fournie à l'eau $P_2 = Ex_{18} - Ex_{17}$ |
| 3 | Réchauffeur | Eviter le givrage de l'air | Variation d'exergie fournie au Fluide frigorigène $R_3 = Ex_3 - Ex_4$ | Variation d'exergie fournie à l'air $P_3 = Ex_8 - Ex_7$ |
| 4 | Détendeur | Détendre le FF | Exergie à l'entrée $R_4 = Ex_4$ | Exergie à la sortie $P_4 = Ex_5$ |
| 5 | Évaporateur | Évaporer le FF | $R_5 = Ex_{14} - Ex_{15} + Ex_5$ | $P_5 = Ex_1$ |
| 6 | Récupérateur | Réchauffer l'air soufflé | Variation d'exergie de l'air extrait $R_6 = Ex_{11} - Ex_{12}$ | Variation d'exergie de l'air soufflé $P_6 = Ex_9 - Ex_8$ |
| 7 | Ventilateur air soufflé | Faire circuler l'air | Travail électrique $R_7 = W_7$ | Variation d'exergie de l'air $P_7 = Ex_{10} - Ex_9$ |
| 8 | Ventilateur air extrait | Faire circuler l'air | Travail électrique $R_8 = W_8$ | Variation d'exergie de l'air $P_8 = Ex_{13} - Ex_{12}$ |
| 9 | Ventilateur air rejeté | Faire circuler l'air | Travail électrique $R_9 = W_9$ | Variation d'exergie de l'air $P_9 = Ex_{16} - Ex_{15}$ |
| 10 | Pompe | Faire circuler l'eau pour chauffer le plancher | Travail électrique $R_{10} = W_{10}$ | Variation d'exergie de l'eau $P_{10} = Ex_{19} - Ex_{18}$ |
| 11 | Séparateur | | $R_{11} = Ex_0$ | $P_{11} = Ex_6 + Ex_7$ |
| 12 | Boite de mélange | | $R_{12} = Ex_6 + Ex_{13}$ | $P_{12} = Ex_{14}$ |
| TOTAL | | | $Ex_0 + W_{cp} + W_7 + W_8 + W_9 + W_{10}$ | $Ex_{10} - Ex_{11} + Ex_{19} - Ex_{17} + Ex_{16}$ |

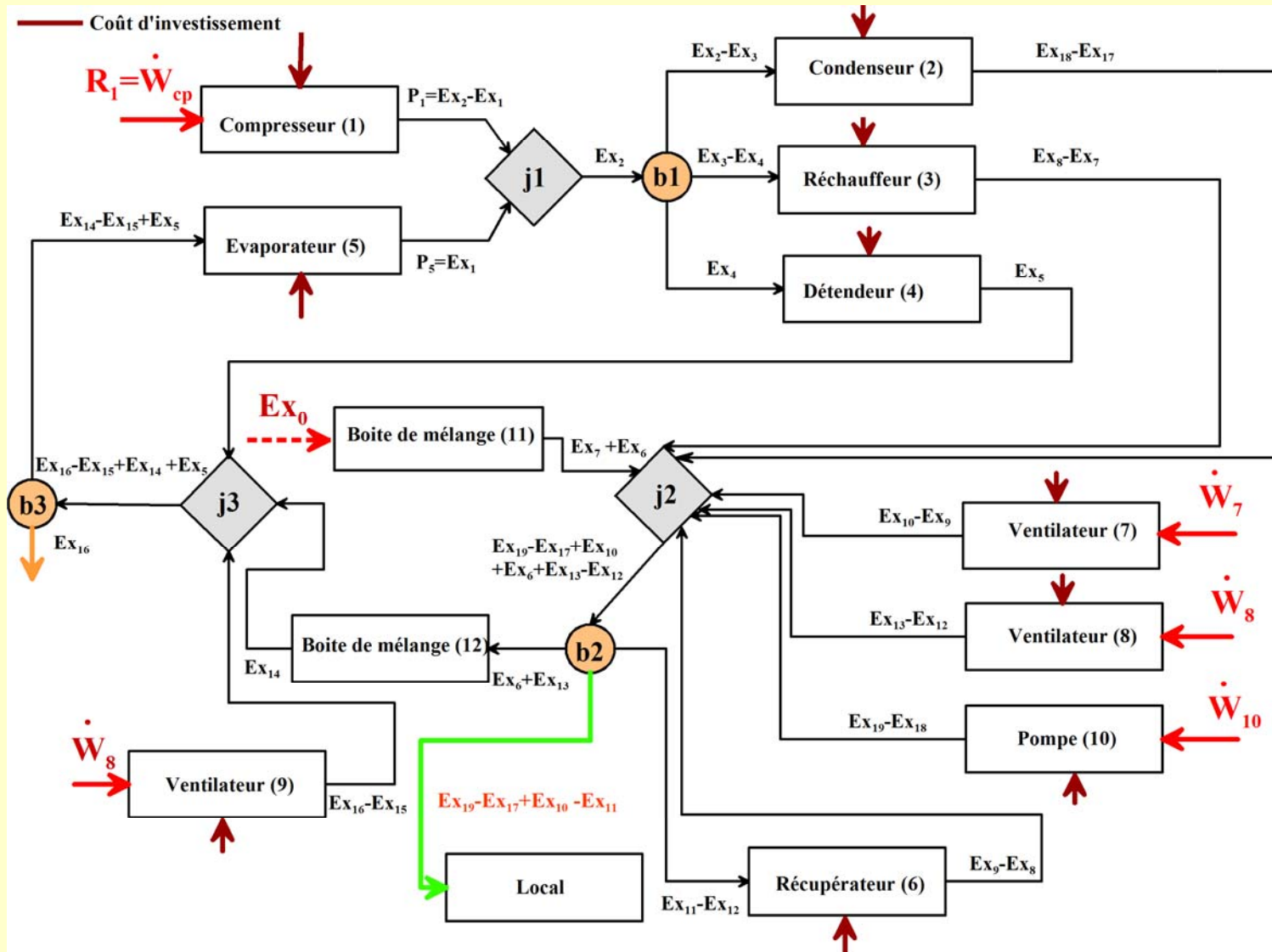
Schéma physique \longrightarrow Structure productive

Dans une structure productive, les composants sont représentés par des rectangles, tandis que les lignes qui les relient correspondent aux flux d'exergie qui sont échangés : "ressources" en entrée et "produits" en sortie.

Etant donné qu'un flux d'exergie peut être partagé entre plusieurs composants, il est nécessaire d'introduire des pseudo-nœuds pour représenter les mélanges et les répartitions d'exergie.

Dans la structure productive, les mélangeurs (ou jonctions) ont la forme de losanges, et les diviseurs (embranchements) celle de cercles.

Structure productive de l'installation



Fonctionnement Hiver

Bilan thermoéconomique de chaque unité

$$k_{P_i}^* = k_i k_{R_i}^* + \frac{\dot{Z}_i}{P_i}$$

où

$$k_i = \frac{R_i}{P_i}$$

R_i = Ressources (flux d'exergie kW)

$k_{R_i}^*$ = coût unitaire monétaire des Ressources (€/kJ)

P_i = Produits (flux d'exergie kW)

$k_{P_i}^*$ = coût unitaire monétaire des Produits (€/kJ)

\dot{Z}_i = coût de l'équipement (€/s)

Pour les jonctions

Le coût du produit est proportionnel au coût des ressources

Pour les diviseurs

Le coût de chaque produit est le même et est égal au coût de la ressource.

$Z = \text{coût de l'équipement (€)}$

- Recensement des catalogues des fabricants
- Étude des abaques dans des ouvrages spécialisés (chemical engineering handbook, heat exchangers handbook,...)
- Développement de corrélations

Exemple pour le coût du compresseur

$$Z_1 = \frac{A_1 \dot{m}_{ff}}{B_1 - \eta_{isentropique}} \left(\frac{HP}{BP} \right) \ln \left(\frac{HP}{BP} \right)$$

$$\dot{Z} = \tau Z \quad \text{€/s}$$

Avec τ (s^{-1}) un paramètre tenant compte du temps de fonctionnement de l'équipement (temps de retour, taux d'amortissement,...)

Conditions de fonctionnement

Les résultats sont présentés pour un fonctionnement standard :

Fonctionnement hiver quand la température extérieure est $T_s = -7\text{ °C}$ et $T_h = -8\text{ °C}$.

La température dans la maison est égale à 20 °C pour une charge de 3645 W .

Les paramètres de fonctionnement sont les suivants :

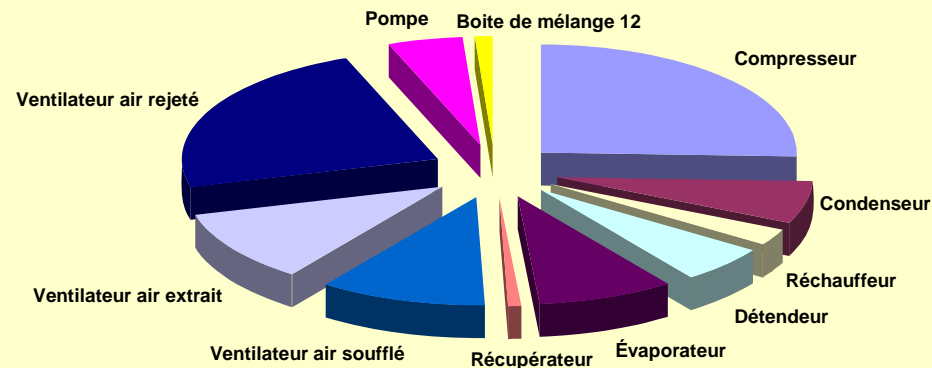
- Efficacité du réchauffeur = 30% ,
- Efficacité de l'échangeur (récupérateur) = 80% ,
- Rendement des ventilateurs = 80% ,
- Rendement de la pompe = 15% ,
- Cylindrée du compresseur = $7,5\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$.

Le modèle énergétique permet de calculer tous les autres paramètres.

La pression et la température de référence de l'environnement est :
 $P_o = 0.1013\text{ MPa}$ and $T_o = -7\text{ °C}$ la température de l'air extérieur.

Le coût de l'électricité est égal à $0,1106\text{ Euros/kWh}$ correspondant au tarif des heures pleines en France.

| Composant | Destruction d'exergie (en %) | Coefficient de production k_i |
|-------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| Compresseur | 25,64 | 1,48 |
| Condenseur | 6,27 | 1,23 |
| Réchauffeur | 2,62 | 4,36 |
| Détendeur | 5,38 | 1,09 |
| Évaporateur | 8,74 | 1,17 |
| Récupérateur | 0,88 | 1,32 |
| Ventilateur air soufflé | 10,48 | 14,50 |
| Ventilateur air extrait | 10,84 | 26,90 |
| Ventilateur air rejeté | 23,25 | 53,73 |
| Pompe | 4,79 | 62,03 |
| Boîte de mélange | 1,12 | 7,91 |



Répartition de la destruction d'exergie

Résultats

Fonctionnement Hiver

Air extérieur $T_s = -7^\circ\text{C}$ / $T_h = -8^\circ\text{C}$

| Composant | Destruction d'exergie (en %) | Coefficient de production k_i |
|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Compresseur | 25,64 | 1,48 |
| Condenseur | 6,27 | 1,23 |
| Réchauffeur | 2,62 | 4,36 |
| Détendeur | 5,38 | 1,09 |
| Évaporateur | 8,74 | 1,17 |
| Récupérateur | 0,88 | 1,32 |
| Ventilateur air soufflé | 10,48 | 14,50 |
| Ventilateur air extrait | 10,84 | 26,90 |
| Ventilateur air rejeté | 23,25 | 53,73 |
| Pompe | 4,79 | 62,03 |
| Boite de mélange | 1,12 | 7,91 |

Résultats

Fonctionnement Hiver

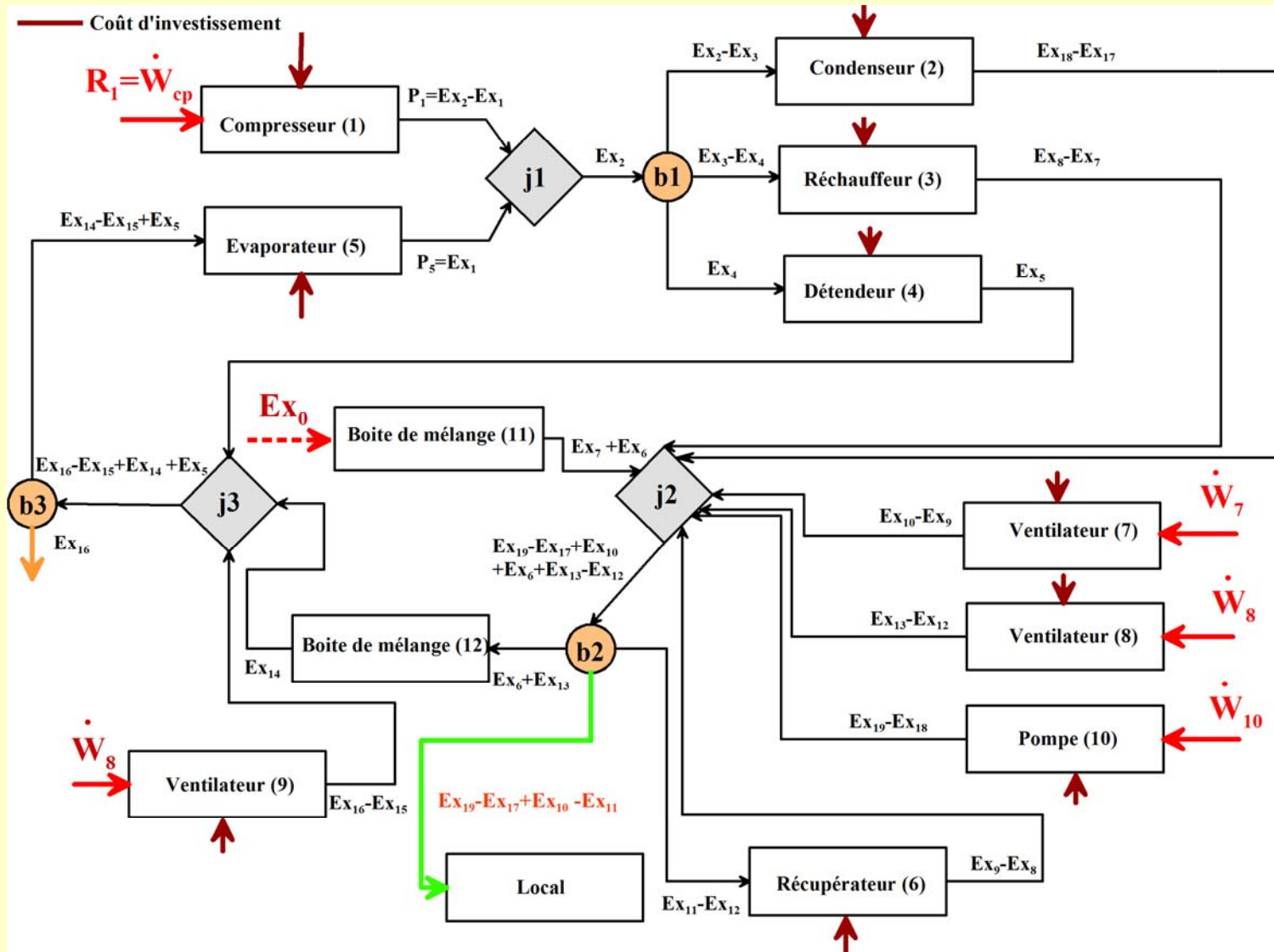
Air extérieur $T_s = -7^\circ\text{C}$ / $T_h = -8^\circ\text{C}$

| Composant | Coût de la ressource (€/kWh) | Coût du produit (avec investissement) (€/kWh) |
|-------------------------|---------------------------------|---|
| Compresseur | 0.1106 | 0.2281 |
| Condenseur | 0.4954 | 0.7016 |
| Réchauffeur | 0.4954 | 3.518 |
| Détendeur | 0.4954 | 0.5479 |
| Évaporateur | 0.6204 | 0.7717 |
| Récupérateur | 1.000 | 1.564 |
| Ventilateur air soufflé | 0.1106 | 2.725 |
| Ventilateur air extrait | 0.1106 | 5.054 |
| Ventilateur air rejeté | 0.1106 | 8.476 |
| Pompe | 0.1106 | 22.63 |
| Boite de mélange | 1.000 | 7.917 |

ce=0.1106 {Euros/kwh Heures
Pleines}

Valeur du produit final = **1,00 €/kWh**

Structure productive de l'installation



Fonctionnement Hiver

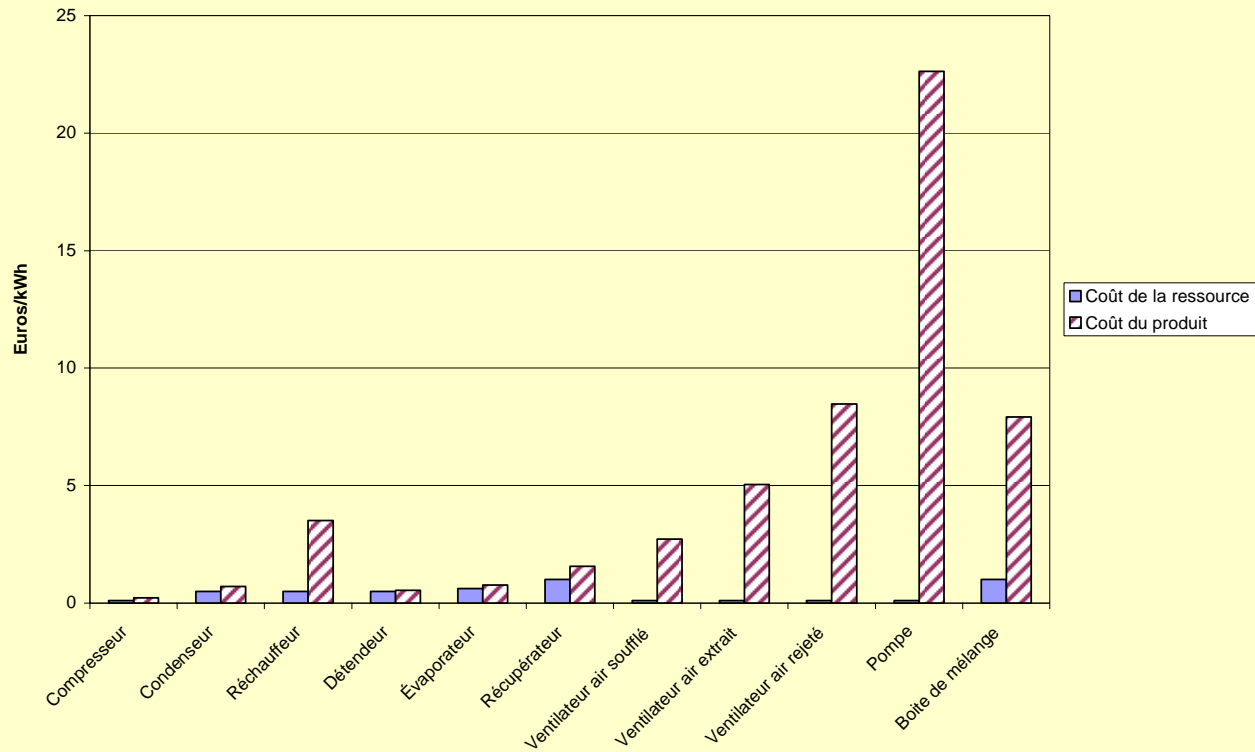
Résultats

Fonctionnement Hiver

Air extérieur $T_s = -7^\circ\text{C} / T_h = -8^\circ\text{C}$

| Composant | Coût de la ressource (€/kWh) | Coût du produit (avec investissement) (€/kWh) |
|-------------------------|---------------------------------|---|
| Compresseur | 0,1106 | 0,2281 |
| Condenseur | 0,4954 | 0,7016 |
| Réchauffeur | 0,4954 | 3,518 |
| Détendeur | 0,4954 | 0,5479 |
| Évaporateur | 0,6204 | 0,7717 |
| Récupérateur | 1,000 | 1,564 |
| Ventilateur air soufflé | 0,1106 | 2,725 |
| Ventilateur air extrait | 0,1106 | 5,054 |
| Ventilateur air rejeté | 0,1106 | 8,476 |
| Pompe | 0,1106 | 22,63 |
| Boite de mélange | 1,000 | 7,917 |

ce=0,1106 {Euros/kwh
Heures Pleines}



Coûts de la ressource et du produit pour chaque composant (fonctionnement standard)

Influence des paramètres (variation de $\pm 20\%$)

| Coût du produit final €/kWh | valeur initiale - 20 % | valeur initiale | valeur initiale + 20 % |
|--|---------------------------|-----------------|---------------------------|
| efficacité du récupérateur | 1,015 | 1,00 | 0,9831 |
| rendement des ventilateurs air soufflé air extrait | 1,006 | 1,00 | 0,9946 |
| rendement du ventilateur air rejeté | 1,002 | 1,00 | 0,9989 |
| rendement de la pompe | 1,001 | 1,00 | 0,9999 |
| rendement effectif du compresseur | 0,9594 | 1,00 | 1,086 |

Influence des paramètres sur le coût exergétique monétaire du produit final

- Efficacité du récupérateur, rendement des ventilateurs, rendement de la pompe
 - Peu d'influence sur le coût du produit final
- Rendement effectif
 - Le coût du produit final augmente avec l'augmentation de ce paramètre.

Conclusions

- **Étude énergétique**
 - Permet une analyse complète du fonctionnement de l'installation et une optimisation de ses performances selon différents paramètres.
 - Outil de prédimensionnement (ballon ECS, PAC, échangeurs,...)
 - Outil d'évaluation de la performance en fonction de paramètres tels que le climat, le scénario d'utilisation...
- **Étude thermoéconomique**
 - Permet d'identifier les sources de destruction d'exergie dans un processus, pour ensuite chercher à les minimiser (prise en compte du coût);
 - Fournit les outils nécessaires pour l'analyse globale de systèmes complexes.