



Rentabilité économique d'un projet

Jean-Marie SEYNHAEVE

Pertes énergétiques - évaluation financière

Faisabilité économique - Analyse de sensibilité

Risque financier - Moyens de financement.

Cas d'étude :

Économiseur d'une chaudière

L'isolation thermique - Épaisseur optimale d'isolant

REF Manuel de Préparation des études de faisabilité industrielle - ISBN 92-1-206166-4

Organisation des Nations unies pour le développement industriel -1993





Notions de base et méthodologie

Introduction :

1. Évaluation des économies annuelles du projet à l'année 0 :

⇒ *Économie annuelle par type d'énergie*

⇒ *Évaluation des frais annuels de maintenance et d'entretien*

⇒ *Évaluation de l'économie annuelle nette*

$$S_0 = \sum_{i=\text{type}} AS_i \pi_i - F_{\text{entretien}}$$

2. Évaluation de l'investissement :

⇒ *Coût des études*

⇒ *Coût des équipements*

⇒ *Frais divers : suivi des travaux, réception, assurances etc...*

⇒ *Gros projet : temps de réalisation ...*

C_0



Bases d'analyse économique

1. Évolution de la valeur monétaire \Rightarrow inflation ?

\Rightarrow *Taux d'intérêt = f (inflation..., risque financier...)*

\Rightarrow *Évolution du prix de l'énergie \neq taux d'intérêt*

2. Comparaison avec des installation de référence :

3. Bases d'analyse :

\Rightarrow *Comparaison entre les dépenses annuelles et économies*

\Rightarrow *Valeur actualisée : coût de l'investissement \Leftrightarrow économies futures*

4. Influence de facteurs spécifiques :

\Rightarrow *mesures politiques en faveur de l'URE*

\Rightarrow *Taxes à la pollution : CO_2*

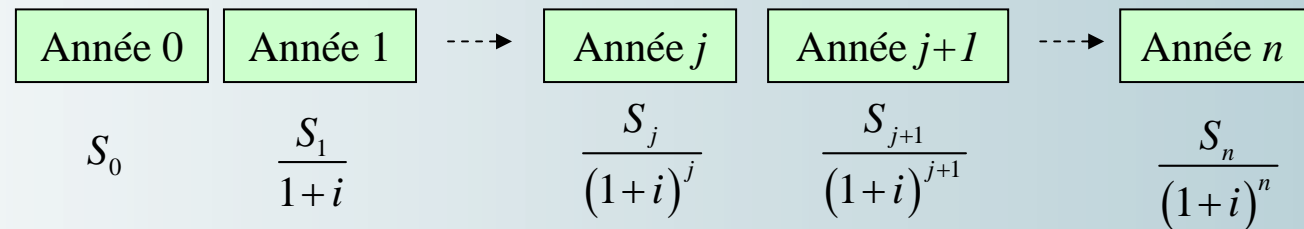
\Rightarrow *Bénéfices du point de vue « environnement »*

Notions de base

1. Notion d'actualisation :

⇒ Soit un taux d'intérêt i

⇒ Remboursement (ou épargne) annuel S_j pendant n années



Actualisation du remboursement = Capital emprunté

$$C = \sum_{j=0}^n \frac{S_j}{(1+i)^j}$$

2. Notion d'annuité constante = remboursement annuel constant S

$$C = S \left(\sum_{j=0}^n \frac{1}{(1+i)^j} \right) = S \frac{(1+i)^{n+1} - 1}{i(1+i)^n}$$

$$S = \alpha C$$

Annuité :

$$\alpha = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^{n+1} - 1}$$



3. Valeur actualisée nette (VAN) - Net present value (NPV)

⇒ Soit une inflation i du prix de l'énergie.

⇒ Économie AS_j pendant n années.

⇒ Investissement C (éventuellement emprunté)

$$\boxed{VAN = \sum_{j=0}^n \frac{AS_j}{(1+i)^j} - C} \quad \text{Si } AS_j = AS \quad \boxed{VAN = \frac{AS}{\alpha} - C}$$

⇒ Valeur positive du VAN ?

4. Ratio de la valeur actualisé nette (RVAN - RNPV)

$$\boxed{RVAN = \frac{VAN}{C} \geq 0}$$

5. Taux de rentabilité interne (TRI) - Rate of Return on investment (ROI)

$$\boxed{\sum_{j=0}^n \frac{AS_j}{(1+TRI)^j} - C = 0}$$



6. Discounted Break-Even Point (DBEP)

⇒ Investissement maximum (VAN = 0)

$$DBEP = \sum_{j=0}^n \frac{AS_j}{(1+i)^j}$$

7. Temps de retour d'investissement simple - Simple Pay-back Time (SPBT)

⇒ Nombre d'années sans compter l'intérêt

$$SPBT = \frac{C}{AS_0}$$

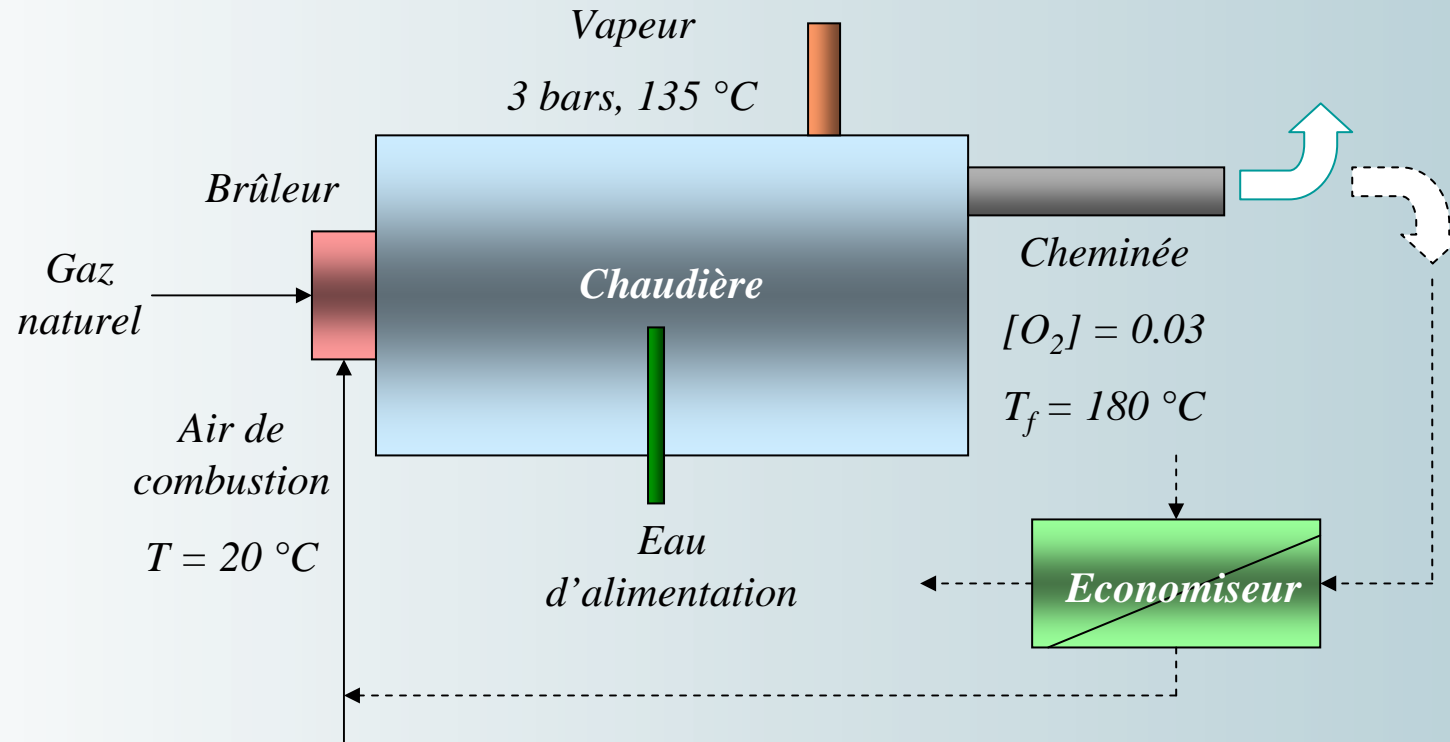
8. Temps de retour d'investissement - Pay-back Time (PBT)

⇒ Nombre d'années PBT pour VAN = 0

$$\sum_{j=0}^{PBT} \frac{AS_j}{(1+i)^j} - C = 0$$



Cas d'étude : Économiseur d'une chaudière



• Caractéristiques chaudière

Puissance thermique : 10 MW
Utilisation : 4000 h/an
Prix du combustible : 0.25 €/m^3_N

• Caractéristiques économiseur

kS_t (AU) : 0.7 kW/K
Courant croisé « fluides non mélangés »
Durée de vie : 10 ans
Coût de l'installation : 30000 €

Investissez-vous dans cette amélioration ?

Rentabilité économique d'un projet industriel

Évaluation des conditions de fonctionnement de la chaudière

Combustible

• *Composition* : $[CH_4] = 0.81$ $[C_2H_6] = 0.05$ $[N_2] = 0.11$ $[CO_2] = 0.03$...

• *Pouvoir calorifique* :

$$PCS = 12750[H_2] + 12620[CO] + 39710[CH_4] + 58950[C_2H_4] + 69210[C_2H_6] + \dots$$

$$PCS = 35626 \text{ kJ/m}^3_N$$

• *Débit nominal* :

$$Q_{comb} = \frac{P}{PCI}$$

$$Q_{comb} = 0.287 \text{ m}^3_N/s$$

• *Consommation annuelle* :

$$C = 0.287 \times 3600 \times 4000 = 4132800 \text{ m}^3_N/an$$

• *Coût annuel combustible* :

$$F_{combustible} = \pi_f C$$

$$F_{combustible} = 1033202 \text{ €/an}$$

Combustion

Avant combustion			Après combustion			
Combustible	1 Nm3	Nm3 O2	Nm3 CO2	Nm3 H2O	Nm3 N2	Nm3 O2
[CH4]	0.81	1.620	0.810	1.620	-	-
[C2H6]	0.05	0.175	0.100	0.150	-	-
[N2]	0.11	-	-	-	0.110	-
[CO2]	0.03	-	0.030	-	-	-
Air	-	-	-	-	6.749	-
Stoechiométrie	1	1.795	0.940	1.770	6.859	-
Pratique		1.795λ	0.940	1.770	6.75λ+0.11	1.795(λ-1)

• Excès d'air : $[O_2]' = \frac{1.795(\lambda-1)}{6.75\lambda+1.05} = 0.03$

$\lambda = 1.147$

• Pouvoir comburivore: $V_{a,\lambda} = \frac{1.795\lambda}{0.21}$ $V_{a,\lambda} = 9.804 \text{ m}^3_N \text{ d'air} / \text{m}^3_N \text{ de gaz}$

• Pouvoir fumigène : $V_{f,\lambda} = 0.940 + 1.770 + (6.75\lambda + 0.11) + 1.795(\lambda - 1)$

$V_{f,\lambda} = 10.826 \text{ m}^3_N \text{ d'air} / \text{m}^3_N \text{ de gaz}$

• Débit d'air : $Q_{air} = Q_{comb} V_{a,\lambda}$ $Q_{air} = 2.814 \text{ m}^3_N/s = 3.638 \text{ kg/s}$

• Débit de fumée : $Q_{fumée} = Q_{comb} V_{f,\lambda}$ $Q_{fumée} = 3.107 \text{ m}^3_N/s = 4.017 \text{ kg/s}$

Évaluation des performances de l'économiseur

• Caractéristiques de fonctionnement

- Capacité thermique côté air :

$$C_{air} = Q_{air} c_p$$

$$C_{air} = 3.656 \text{ kW/K}$$

- Capacité thermique côté fumée :

$$C_{fumée} = Q_{fumée} c_p$$

$$C_{fumée} = 4.037 \text{ kW/K}$$

- Rapport des capacités :

$$C = \frac{C_{\min}}{C_{\max}}$$

$$Z = 0.906$$

• Performances thermique

- Nombre d'unités de transfert :

$$NTU = \frac{kS_t}{C_{\min}}$$

$$NTU = 0.191$$

- Efficacité de l'économiseur :

$$\varepsilon = 1 - \exp \left\{ \frac{NTU^{0.22}}{C} \left[\exp(-C \cdot NTU^{0.78}) - 1 \right] \right\}$$

$$\varepsilon = 0.155$$

- Puissance thermique :

$$P_{th} = \varepsilon C_{\min} (T_{c,e} - T_{f,e})$$

$$P_{th} = 90.7 \text{ kW}$$

- Températures de sortie :

$$T_{f,s} = 157.5 \text{ °C}$$

$$T_{a,s} = 44.8 \text{ °C}$$

Évaluation financière du projet

- Évaluation des économies annuelles du projet à l'année 0 :

- Économie en énergie :

$$\Delta E = 3600 P_{th} U$$

$$\Delta E = 1306080 \text{ MJ/an}$$

- Économie en gaz naturel :

$$\Delta C_{\text{gaz}} = \frac{\Delta E}{PCS}$$

$$\Delta C_{\text{gaz}} = 36661 \text{ m}^3_N/\text{an}$$

- Économie brute en € :

$$AGS = \Delta C_{\text{gaz}} \pi_f$$

$$AGS = 9165 \text{ €/an}$$

- Économie nette en € :

$$AS = AGS - F_{\text{entretien}}$$

$$AS = 7332 \text{ €/an}$$

- Valeur actualisée des économies = DPEP

- Soit $i = 0.08$ et $n = 10$ ans

$$DBEP = \sum_{j=0}^n \frac{AS_j}{(1+i)^j} = \frac{AS}{\alpha}$$

$$\alpha = 0.129$$

$$DBEP = 56530 \text{ €}$$

- Valeur actualisée nette = VAN (NPV)

$$VAN = DBEP - C = 26530 \text{ €}$$



- Taux de rentabilité interne TRI (ROI)

$$\sum_{j=0}^n \frac{AS_j}{(1+TRI)^j} - C = 0$$

$$TRI = 30 \%$$

- Temps de retour d'investissement PBT

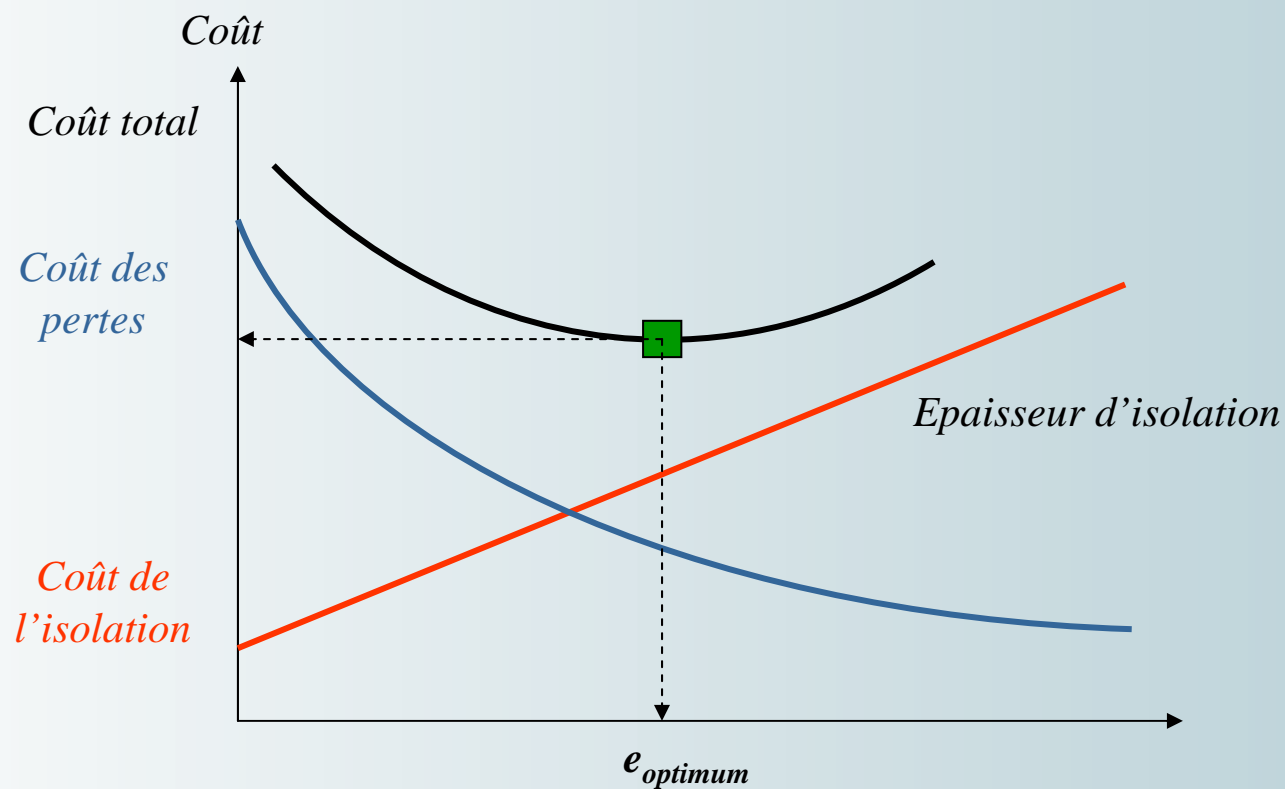
$$\sum_{j=0}^{PBT} \frac{AS_j}{(1+i)^j} - C = 0$$

$$PBT = 3.7 \text{ années}$$

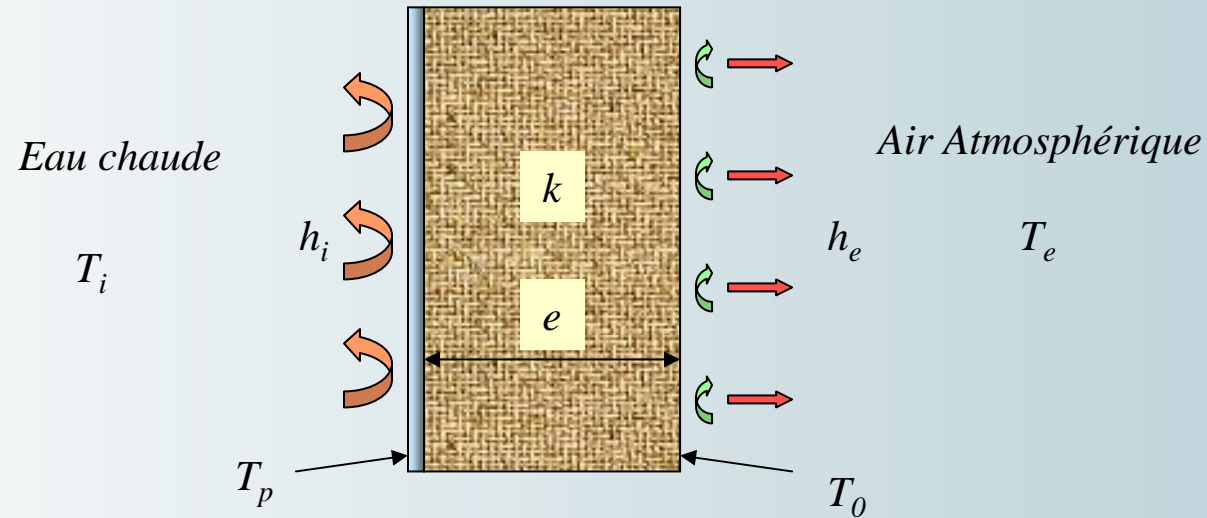
Conclusions

- Bonne rentabilité du projet.
- Analyse du risque :
 - ⇒ *Tenue à la corrosion de l'économiseur*
 - ⇒ *Maintenance de l'économiseur (Fouling effect)*
 - ⇒ *Dégradation des performances thermiques*
- Contrat de maintenance - Garantie.
- Protocole de réception provisoire et définitive.
- Influence spécifique sur le fonctionnement de la chaudière ?

Cas d'étude : Épaisseur optimale d'isolation thermique



Exemple : Isolation thermique d'une chaudière



Définitions :

- ⇒ e Épaisseur d'isolation
- ⇒ k Conductivité de l'isolant
- ⇒ h_i, h_e Coefficients de transfert par convection (+ rayonnement)
- ⇒ $\Delta T = T_i - T_e$ Différence de température
- ⇒ T_p Température de paroi intérieure
- ⇒ T_0 Température de paroi extérieure



- Flux de chaleur sans isolation en W/m^2

$$q_0 = \frac{\Delta T}{R_{total,sans}}$$

Résistance thermique totale :

$$R_{total} = \frac{1}{h_i} + \frac{e_{metal}}{k_{metal}} + \frac{1}{h_e}$$

Hypothèses : $1/h_i \ll 1/h_e$

$$e_{metal}/k_{metal} \ll 1/h_e \Rightarrow T_p = T_i$$

$$q_0 = h_e (T_p) \Delta T$$

- Flux de chaleur avec isolation en W/m^2

$$q = \frac{\Delta T}{R_{total,isolé}}$$

avec

$$R_{total,isolé} = \frac{e}{k} + \frac{1}{h_e (T_0)}$$

- Économie de puissance thermique en W/m^2

$$\Delta q = \left(h_e (T_p) - \frac{1}{\frac{e}{k} + \frac{1}{h_e (T_0)}} \right) \Delta T$$



- Économie annuelle en énergie primaire en kWh/m²/an

$$\Delta E = \frac{U \Delta q \cdot 10^{-3}}{\eta}$$

U : nombre d'heures d'utilisation par an

η : rendement de transformation énergie primaire ⇒ énergie thermique

- Économie annuelle en €/an

$$AS = \pi_f \Delta E$$

π_f : prix du combustible en €/kWh

- Prix de l'isolation

$$C = C_0 + C_p e$$

- Remboursement annuel de l'isolation

$$c = \alpha C$$

avec

$$\alpha = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^{n+1} - 1}$$

i : taux d'intérêt annuel

n : durée de remboursement en années ⇒ durée de vie



- Économie nette annuelle en €an

$$ANS = AS - \alpha C = K \left(h_e(T_p) - \frac{1}{\frac{e}{k} + \frac{1}{h_e(T_0)}} \right) - \alpha(C_0 - C_p e) \quad \text{avec} \quad K = \frac{\pi_f U \Delta T \cdot 10^{-3}}{\eta}$$

- Épaisseur optimale de l'isolant

$$\frac{d(ANS)}{de} = 0 \quad \Rightarrow \quad e_{optimum} = k \left(\sqrt{\frac{K}{\alpha k C_p}} - \frac{1}{h_e(T_0)} \right)$$

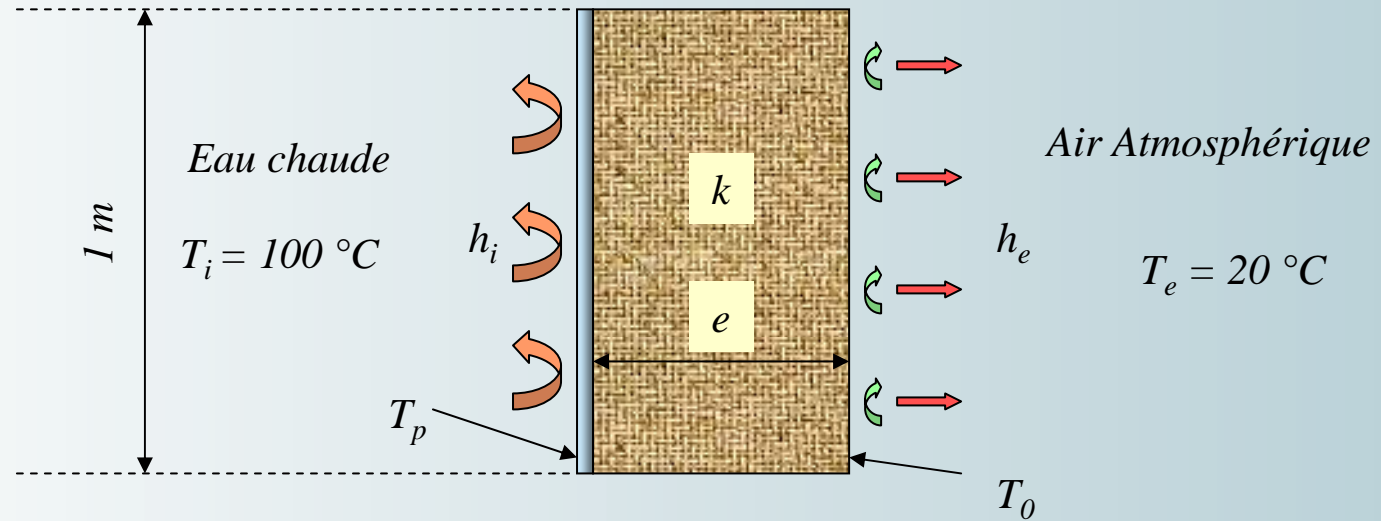
- Conclusions :

- ⇒ Conductivité du matériau isolant (k)
- ⇒ Utilisation annuelle de l'installation (U)
- ⇒ Prix du combustible (π_f)
- ⇒ Rendement chaudière (η)
- ⇒ Annuité $\alpha = f(i, n)$
- ⇒ Le terme C_p du prix de l'isolant
- ⇒ Coefficient de convection (h_e)
- ⇒ Différence de température (ΔT)

Analyse de
sensibilité



Exemple chiffré



• Évaluation du coefficient de convection h_e

$$Nu = f(Gr, Pr)$$

(1) Chapman

$$Nu = 0.129 (Gr Pr)^{1/3}$$

(2) Jacob

$$Nu = 0.555 (Gr Pr)^{1/4}$$

(3) Corrélation simplifiée

$$h_e = 2(\Delta T)^{1/3}$$

pour $Gr \triangleq \frac{\rho^2 g \beta \Delta T L^3}{\mu^2} \geq 10^9$

• Coefficient de convection h_e

Grandeur	Symbole	Unité	$T_p=40\text{ °C}$	$T_p=100\text{ °C}$
Température moyenne	T_m	°C	30	60
Coefficient d'expansion	Beta	$1/°C$	0.00330	0.00300
Masse volumique	Rho	kg/m ³	1.164	1.059
Différence de température	DT	°C	20	80
Viscosité dynamique	Mu	Ns/m ²	1.85E-05	2.00E-05
Nombre de Prandlt	Pr	-	1	1
Nombre de Railey	Ra=GrPr	-	2.563E+09	6.609E+09
Conductivité de l'air	k	W/mK	0.027	0.03

Coefficient h_e (W/m ² /K)	$T_p=40\text{ °C}$	$T_p=100\text{ °C}$
Chapman	4.767	7.263
Jacob	3.372	4.747
Simplifiée	5.429	8.618
Moyenne	4.522	6.876

- Flux sans isolation en W/m^2 : $T_0 = 100\text{ °C}$

$$q_{conv,0} = 6.876 \cdot 80 = 550$$

$$q_{ray,0} = \sigma \varepsilon (T_0^4 - T_e^4) = 640$$

$$h_e(T_0 = 100°C) = 1190 / 80 \cong 15 \frac{W}{m^2 K}$$

- Flux avec isolation en W/m^2 : $T_0 = 40\text{ °C}$

$$q_{conv,0} = 4.522 \cdot 20 = 90.5$$

$$q_{ray,0} = \sigma \varepsilon (T_0^4 - T_e^4) = 12$$

$$h_e(T_0 = 40°C) = 112 / 20 \cong 5.60 \frac{W}{m^2 K}$$

Exemple chiffré : Analyse de sensibilité

Données de base

$$k = 0.05 \text{ W/m/K}$$

$$U = 5000 \text{ h/an}$$

$$\pi_f = 0.02 \text{ €/kWh}$$

$$\eta = 0.8$$

$$C_o = 50 \text{ €/m}^2$$

$$C_p = 1200 \text{ €/m}^3$$

$$i = 0.08$$

$$n = 20 \text{ ans}$$

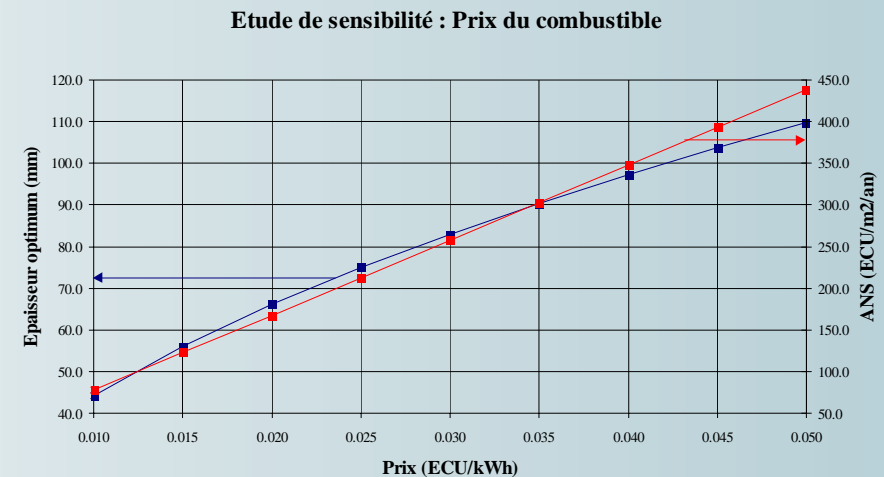
$$\Delta T = 80 \text{ °C}$$

$$h_e(100 \text{ °C}) = 15 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$h_e(40 \text{ °C}) = 5.6 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Sensibilité au prix du combustible

<i>Prix comb.</i>	<i>e optimum</i>	<i>C</i>	<i>ANS</i>
<i>ECU/kWh</i>	<i>mm</i>	<i>ECU/m2</i>	<i>ECU/an/m2</i>
0.01	44.1	103.0	78.3
0.015	56.1	117.3	122.6
0.02	66.1	129.4	167.2
0.025	75.0	140.0	212.1
0.03	83.0	149.6	257.2
0.035	90.4	158.4	302.5
0.04	97.2	166.7	347.8
0.045	103.7	174.4	393.3
0.05	109.8	181.7	438.8





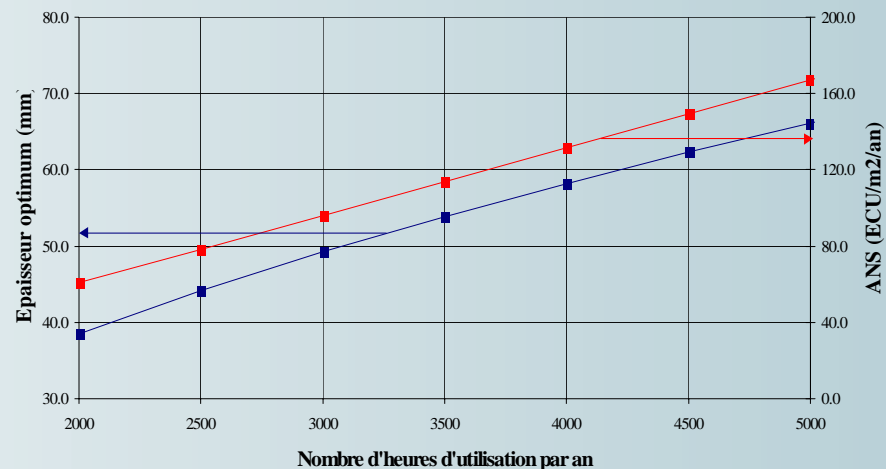
Sensibilité à l'utilisation

<i>U</i>	<i>e optimum</i>	<i>C</i>	<i>ANS</i>
<i>heures/an</i>	<i>mm</i>	<i>ECU/m2</i>	<i>ECU/an/m2</i>
2000	38.5	96.3	60.8
2500	44.1	103.0	78.3
3000	49.2	109.1	96.0
3500	53.9	114.6	113.7
4000	58.2	119.9	131.5
4500	62.3	124.7	149.3
5000	66.1	129.4	167.2
5500	69.8	133.8	185.2
6000	73.3	138.0	203.1

Sensibilité au taux d'intérêt

<i>Intérêt</i>	<i>e optimum</i>	<i>C</i>	<i>ANS</i>
-	<i>mm</i>	<i>ECU/m2</i>	<i>ECU/an/m2</i>
0.05	74.8	139.8	169.7
0.06	71.7	136.0	168.8
0.07	68.8	132.5	168.0
0.08	66.1	129.4	167.2
0.09	63.7	126.4	166.4
0.1	61.5	123.8	165.6
0.11	59.4	121.3	164.8
0.12	57.5	119.0	164.0
0.13	55.7	116.9	163.3
0.14	54.1	114.9	162.5
0.15	52.6	113.1	161.8

Etude de sensibilité : Utilisation



Etude de sensibilité : Intérêt

