



# AUDIT ENERGETIQUE DANS L'INDUSTRIE

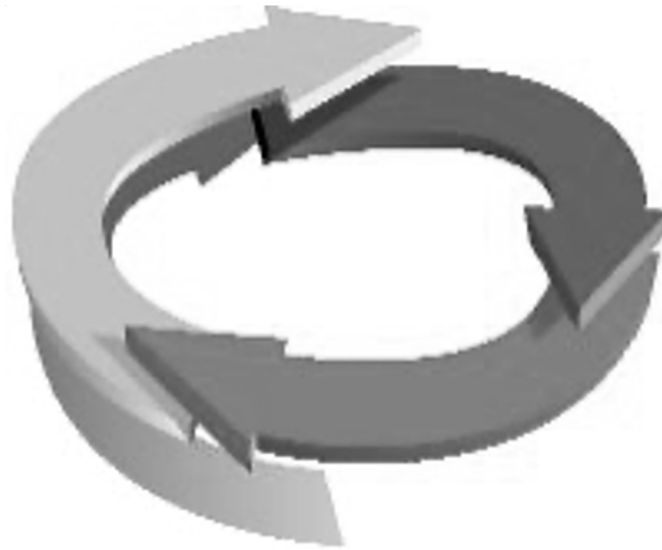
Présenté par: Dr. Hatem ELAMINE

*Année universitaire 2024-2025*

# PLAN

1. Généralités objectifs
2. Méthodologie d'audit
3. Evaluation et Analyse des consommations
4. Bilans énergétiques
5. Usages énergétiques significatifs
6. Ligne de base et benchmarking

# **GENERALITES ET OBJECTIFS**



## Buts d'un audit

- Trouver les pistes d'économie d'énergie
- Pour cela , évaluer les consommations
- Les comparer à des ratios existants
- Voir l'évolution sur plusieurs années

# Un audit énergétique comprend :

Outre les investigations propres à tout process , cela comprend :

## **Examen des installations existantes :**

- Examen site
- Thermographie des équipements
- Examen des installations de chauffage ,de ventilation , de production et de distribution de vapeur , de production de distribution d'air comprimé ,de production et distribution d'eau chaude sanitaire ,d'éclairage ...
- Etude des schémas de principe de fonctionnement actuel et des améliorations futures réalisables
- Etude des cycles de fonctionnement et de la régulation

## **Examen des consommations :**

- Consommations de gaz , mazout ,eau de process et sanitaire
- Consommations électriques ( process , éclairage ,air comprimé , ventilation , climatisation ,..)

# 1. Procédure de l'audit énergétique

- **Étape 1 : Planification de l'audit**

- ⇒ *Définition des objectifs*

- ⇒ *Diviser l'équipement de production en unités (volumes de contrôle)*

- ⇒ *Définition des tâches d'analyse et de surveillance*

- ⇒ *Attribution des responsabilités*

- **Étape 2 : Collecte des données**

- ⇒ *Données de production par produit*

- ⇒ *Données de consommation par type d'énergie*

- ⇒ *Évolution temporelle de la production - consommation (jour, semaine, mois...)*

- ⇒ *Éviter les doubles comptages (Auto-production d'électricité...)*

- **Étape 3 : Réalisation des mesures**

- ⇒ *Définition des campagnes et des matrices d'essais.*

- ⇒ *Inventaire des mesures disponibles sur site.*

- ⇒ *Inventaire des mesures complémentaire à effectuer*

- ⇒ *Préparation de l'instrumentation*

- ⇒ *Réalisation des mesures*

- **Étape 4 : Traitement des données - Bilans d'énergie - Rendements**
  - ⇒ *Traitement des résultats de mesure*
  - ⇒ *Évaluation de consommation spécifiques - comparaisons avec les « standards »*
  - ⇒ *Contrôle des bilans d'énergie - Évaluation des pertes*
  - ⇒ *Interprétation des différences éventuelles - Corrections*
- **Étape 5 : Identification des améliorations possible dans la gestion énergétique**
  - ⇒ *Dans le traitement des données.*
  - ⇒ *Dans le suivi des mesures d'économie...*
- **Étape 6 : Identification des améliorations relatives à la maintenance**
  - ⇒ *Sensibilisation du personnel.*
  - ⇒ *Évaluation des économies possibles*
  - ⇒ *Définition des responsabilités pour la réalisation*
- **Étape 7 : Identification des améliorations demandant peu d'investissement**
  - ⇒ *Isolation thermique*
  - ⇒ *Équilibre électrique ( $\cos\varphi$  , quart-horaire) ...*

- **Étape 8 : Identification des améliorations demandant de gros investissements**
  - ⇒ *Évaluation des économies annuelles nettes.*
  - ⇒ *Évaluation des coût d'investissement.*
  - ⇒ *Analyse de la rentabilité économique et du risque.*
  - ⇒ *Moyens de financement.*
- **Étape 9 : Réparation du rapport**
  - ⇒ *Clarté et concision*
  - ⇒ *Conclusions : rappel des mesures par ordre de priorité.*

## 2. Type de mesures d'économie - Temps de mise en œuvre

- **Immédiat : Psychologique**
  - ⇒ *Comportement du personnel*
  - ⇒ *Planification de la production*
  - ⇒ *Procédure de fabrication ...*
- **Court terme : Maintenance**
  - ⇒ *Entretien : chaudières, échangeurs ...*
  - ⇒ *Pertes d'énergie à l'ambiance : fuites de vapeur, isolation thermique...*
  - ⇒ *Électricité...*
- **Moyen terme : Réseau de distribution et d'utilisation de la chaleur**
  - ⇒ *Réduire la consommation d'énergie noble : électricité, thermique HT.*
  - ⇒ *Accroître l'utilisation d'énergie BT.*
  - ⇒ *Contrôle automatique et optimisé des unités de production et d'utilisation.*
  - ⇒ *Récupération des pertes HT aux moyen d'économiseurs.*
  - ⇒ *etc.*

- **Moyen terme : ingénierie de process (gros investissements)**
  - ⇒ *Procédé discontinu ⇒ procédé continu*
  - ⇒ *Chauffage par effet Joule ⇒ chauffage par induction*
  - ⇒ *Chauffage thermique ⇒ chauffage par micro-ondes*
  - ⇒ *etc.*
- **Long terme : changement du principe de fabrication**
- **Long terme : Process integration**
  - ⇒ *Modification des flux énergétiques, optimisation.*
  - ⇒ *Symbiose avec d'autres entreprises.*
  - ⇒ *etc..*
- **Très long terme : Objectifs sociaux et techniques**
  - ⇒ *Modification des habitudes de consommations*

# 3. Exemple de sommaire de rapport d'audit

- **Introduction : Description de l'entreprise**
  1. *Résumé des activités de l'entreprise : produits et process*
  2. *Consommation d'énergie et coûts*
  3. *Principales sources d'approvisionnement en énergie, principaux consommateurs*
  4. *Objectifs de l'audit, description claire de la mission*
- **1. Gestion de l'énergie dans l'entreprise**
  - 1.1 *Type de gestion, responsabilité, intégration dans l'entreprise*
  - 1.2 *Monitoring des consommations énergétiques et de la production*
  - 1.3 *Évolution passée des consommations spécifiques*
  - 1.4 *Revue des améliorations passées*
  - 1.5 *Recommandations d'amélioration*
- **2. Amélioration des systèmes énergétiques**
  - 2.1 *Description des systèmes*
  - 2.2 *Résultats des campagnes d'essais*
  - 2.3 *Proposition d'améliorations*
  - 2.4 *Évaluation des économies et impact sur la production*
  - 2.5 *Rentabilité économique*

- **4. Amélioration dans l'utilisation de l'électricité**
  - 4.1 *Description du système*
  - 4.2 *Résultats des campagnes de mesure*
  - 4.3 *Proposition d'améliorations, évaluation des économies*
  - 4.4 *Évaluation de la rentabilité économique*
- **5. Conclusions : résumé des recommandations**
  - 5.1 *Actions à court terme : maintenance*
  - 5.2 *Améliorations à moyen et long terme - coût des investissements*
  - 5.3 *Évaluation économique et ordre de priorité des améliorations possibles*
  - 5.4 *Recommandations concernant l'implantation dans l'entreprise*

# 4. Mémento de l'audit énergétique industriel

- **A. Identification de l'entreprise**

- ⇒ *Nom et adresse*

- ⇒ *Personnes contactées : position dans l'entreprise*

- ⇒ *Type d'entreprise :*

- ⇒ *Nombre d'employés :*

- ⇒ *Date de l'audit :*

- **B. Activité - production**

- ⇒ *Flow sheet général indiquant les principales opérations de fabrication*

- ⇒ *Flow sheet des unités de fabrication (étapes de fabrication)*

- ⇒ *Listes des unités de production d'énergie (chaudières, air comprimé etc.)*

- **C. Matières premières et produits**

- ⇒ *Consommation en matières premières : type, quantité, source, transport*

- ⇒ *Recyclage des sous-produits ?*

- ⇒ *Utilisation des déchets dans l'entreprise ou ailleurs.*

- ⇒ *Principaux produits : liste, type, production, capacité de production, chiffre d'affaires*

- **D. Approvisionnement en énergie - Consommation**  
 ⇒ *Liste des consommations d'énergie*

<i>Type</i>	<i>PCI – PCS unité</i>	<i>Quantité par an</i>	<i>Energie/an</i>	<i>Prix / GJ</i>	<i>Coût annuel</i>	<i>Source</i>
Electricité						
Gaz naturel						
Charbon						
Coke						
Bois						
GPL						
Fuel léger						
Fuel lourd						
Autres						
...						

⇒ *Auto-production d'électricité ? Si oui*

⇒ *Type de générateur : diesel, turbine vapeur, turbine gaz, autres*

⇒ *Puissance installée d'auto-production*

⇒ *Production annuelle d'auto-production*

⇒ *Combustible utilisé : type, consommation annuelle, coût annuel*

⇒ *Peut-on augmenter la capacité ?*

- **E. Système de cogénération : production combinée de chaleur et d'électricité**

⇒ *Description :*

- *Source d'énergie primaire : type, consommation, coût*

- *Production de chaleur : quantité en GJ, températures*

- *Production d'électricité : quantité en kWh/an*

- *Utilisation : type d'équipements, consommation annuelle*

⇒ *Depuis quand l'installation de cogénération fonctionne ? Anomalie éventuelles*

⇒ *Prévoit-on d'installer un système de cogénération ou d'accroître la capacité d'un système existant ?*

- **F. Consommation d'électricité**

⇒ *Capacité totale installée*

⇒ *Tension d'alimentation*

⇒ *Consommation annuelle : achat, auto-production*

⇒ *Diagramme de charge : journalier, hebdomadaire, saisonnier, ...*

⇒ *Facteur de puissance moyenne, quart-horaire*

⇒ *Répartition des consommations par type*

- **G. Production de chaleur : Chaudières - Fours ...**

- ⇒ *Nombre d'unités de production :*

- ⇒ *Perspective d'avenir : accroissement, changement ...*

- ⇒ *Caractéristiques des chaudières*

<i>Caractéristiques</i>	<i>Unités</i>	<i>Chaudière 1</i>	<i>Chaudière 2</i>	<i>Chaudière i</i>
Type - modèle	-			
Puissance	kW			
Débit de vapeur	t/h			
Pression vapeur	bar			
Température vapeur	°C			
Type de combustible	-			
Consommation	?			
Production de vapeur	?			
Rendement estimé				

- ⇒ *Source d'alimentation en eau*

- ⇒ *Type de traitement de l'eau*

- ⇒ *Qualité de l'eau après traitement*

- ⇒ *Consommation en eau*

- ⇒ *Recyclage de la vapeur condensée : quantité, température, etc.*

- ⇒ *Puissance de pointe demandée et puissance moyenne*

- ⇒ *Utilisation annuelle*

- ⇒ *Entretien, maintenance, réglage (automatique ou non)*

- **H. Utilisation de l'énergie**

⇒ *Principaux équipements de consommation d'énergie*

<i>Équipement</i>	<i>Type d'énergie</i>	<i>Consommation d'énergie</i>	<i>Coût annuel</i>	<i>S.E.C</i>	<i>Efficacité</i>	<i>Alternative possible</i>

- ⇒ *Énergie utilisée au chauffage et/ou au conditionnement d'air des bâtiments*
- ⇒ *Énergie utilisée pour la manutention et le transport dans l'entreprise*
- ⇒ *Préchauffage des combustibles : moyen et contrôle ?*
- ⇒ *Autre remarques*

# Définition des objectifs

- La première étape d'un audit énergétique est la définition des objectifs : pourquoi désire-t-on réaliser un audit ?
- L'audit énergétique est en effet souvent réalisé non seulement pour réduire la facture énergétique d'un procédé mais de manière plus large pour augmenter les performances du ou des procédés étudiés.

# Optique

1- Utilisation rationnelle de l'énergie

2- Augmentation de capacité et/ou de performances

# Objectif

- Réduire la facture énergétique
  - Changer de combustible
  - Installer une unité de cogénération
  - Intégrer le procédé
- 
- **Utiliser de manière optimale les équipements existants**
    - ✓ Produire plus
    - ✓ Utiliser moins de matières premières
    - ✓ Augmenter le recyclage
  - **Intégrer des nouvelles méthodes de production**
    - ✓ Renouvellement de l'équipement
    - ✓ Nouvelles technologies

## 3 - Opération du procédé

## 2- Emissions –environnement

- **Maintenance**
  - ✓ Maintenance possible sans arrêts
  - ✓ Intégration d'un système de nettoyage en continu
- **Opérabilité**
  - ✓ Encrassement moins rapide
  - ✓ Meilleure stratégie de contrôle
  - ✓ Système plus facile à contrôler par l'utilisation des utilitaires
  - ✓ Simplification du système
- **Optimisation des conditions de fonctionnement**

### Diminuer les rejets dans l'air

- ✓ Combustion : NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>
- ✓ Procédé (ex. récupération de condensats)
- ✓ Intégration de technologies de traitement

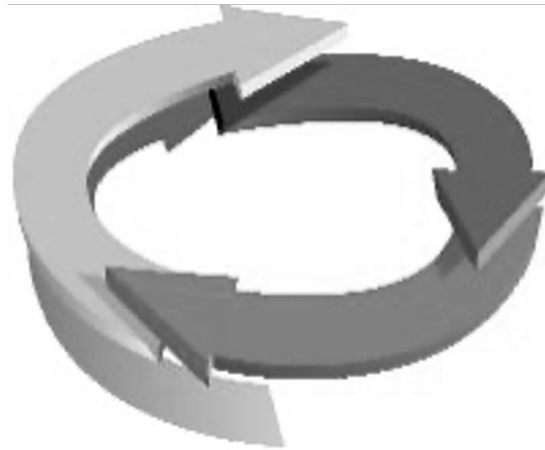
### Utiliser l'eau de manière rationnelle :

- ✓ Eau de refroidissement : économie d'énergie = économie de refroidissement ( par bilan)
- ✓ Support de production (agent de dilution et de transport)
- ✓ Réduction des rejets polluants
- ✓ Intégration de technologies de traitement

### Réduire les rejets solides

# METHODOLOGIE

---



# Méthodologie

- 1. Description du procédé
- 2. Collecte des données
- 3. Modélisation de la Facture énergétique
- 4. Définition des besoins
- 5. Définition de l'objectif énergétique
- 6. Amélioration du procédé
- 7. Intégration des procédés de production
- 8. Transformation rationnelle de l'énergie
- 9. Intégration Eau - Energie - Environnement
- 10. Conception des alternatives
- 11. Evaluation des alternatives

# 1- Description du procédé

- **Description fonctionnelle du procédé**
    - Flowsheet
      - Souvent à établir
    - Equipements
      - Une fonction pour chaque
  - **Limites du système**
    - Entrées usine - sortie usine
    - Environnement
  - **Définition du contexte opérationnel**
    - Opérateur
    - Batch-continus
    - Difficultés d'opération
      - Sécurité
      - Encrassement
      - Maintenance
- => discussion sur le site de production

# Flow sheet

- Block flow diagram
  - Description des opérations principales
- Process flow diagram
- P&ID (Piping and Instrumentation diagram)
- Energy Flow diagram

## 2- Collecte des données

- Documents du procédés
  - PFD , P&ID
  - équipement
- Factures
- Système de mesures
- Campagne de mesures

# Collecte des données

- **Mode de relevé de mesures**
  - Relevés manuels
  - Système de contrôle
  - Relevés ponctuels
  - Mesures spécifiques
- **Type**
  - Moyennes (compteurs)
  - Instantanés (capteurs)
- **Variation - erreurs**
  - Données constructeur
- **Spécifications d'équipement**

# Collecte des données

- Facture
  - Comptabilité énergétique par poste
- Description du procédé
  - data sheets
  - relevés et système de contrôle
- Modèle des opérations
  - Calcul des propriétés thermo
  - Bilans de chaleur et de matière
  - Physique des phénomènes
- Modèle des procédés
  - Relevés de suivi
  - Analyse des mesures disponibles
  - Spécifications du procédé
  - Planification des relevés spécifiques

➡ Thermodynamique

➡ Simulation

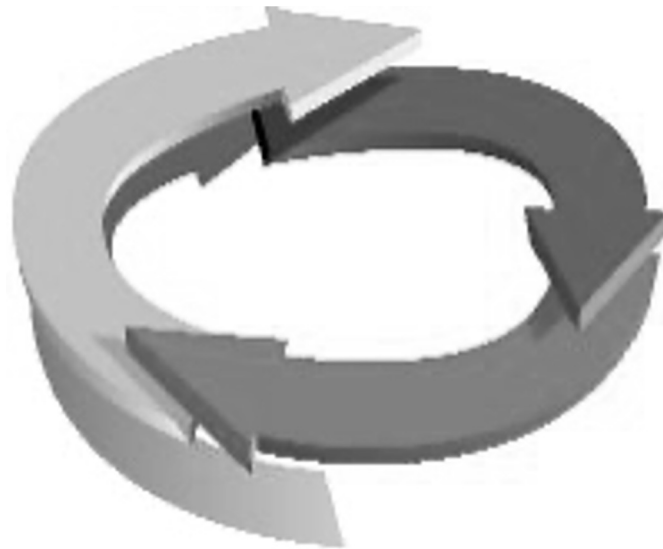
➡ Bases de données

➡ **Réconciliation**

## 4- Définitions des besoins

- *Besoins thermiques (flux chauds et flux froids)*
- *Besoins de compression ou de détente*
- *Besoins électriques*

# EVALUATION DE LA CONSOMMATION



# DONNEES NECESSAIRES

- Factures des services publics pour la période de vérification.
- Registres de production.
- Données de consommation d'eau.
- Dessins d'archives.
- Spécifications techniques des équipements.
- Données météorologiques.
- Registres internes de consommation d'électricité et de combustible.

# Factures de combustible et électricité

- Période de vérification: 12 mois.
- Données récentes.

## Dessin d'archives

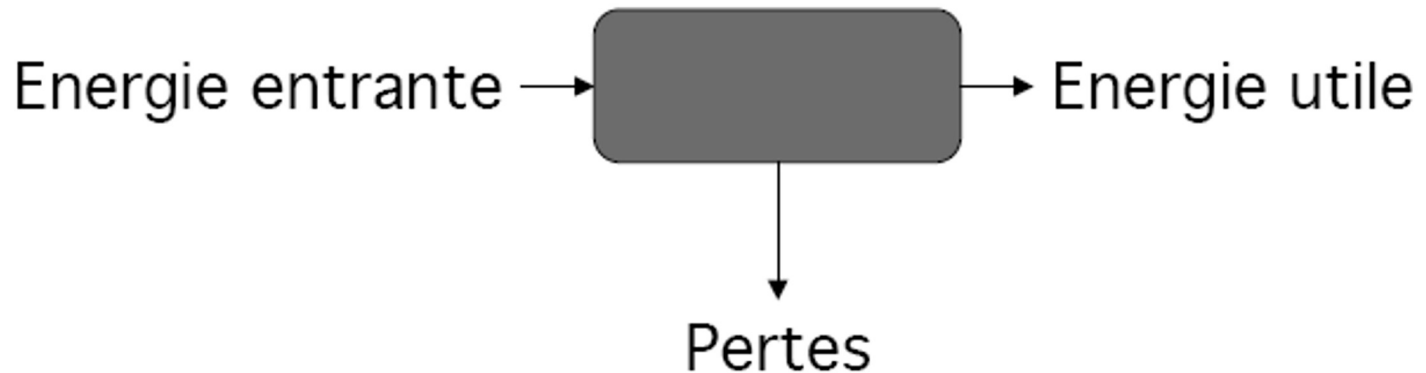
- Surface du plancher.
- Plans des installations.
- Type et nombre d'éclairage.
- Emplacement des compteurs.
- Capacité de l'usine.

# Capacité des équipements

- Dessins de conception ou fiches techniques.
- Manuels d'entretien.
- Registres de l'usine.
- Fabricants.

# Rendement énergétique

$$\text{Rendement} = \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie entrante}}$$



## Consommation d'énergie

- Combustible liquide en litres (L)
- Combustible gazeux en mètres cubes (m<sup>3</sup>).
- Combustibles solides en tonnes (t)
- Électricité en kilowatts-heure (kWh)

# Électricité

- Facteur de puissance: fp
- Demande maximale.
- Facteur de charge.

**Consommation unitaire (kWh)**

**Demande maximale possible x Heures.**

- Coût unitaire moyen.

**Coût total de électricité (Dhs)**

**Consommation unitaire totale (kWh).**

# Politique des 3R

- 3 R

- Réduire
- Recycler
- Réutiliser

- 3 E

- Energie
- Economie
- Environnement

- Procédés

- Reduire
  - Augmentation des performances, nouveaux équipements
- Réutiliser
  - Echanges de chaleur - intégration
- Recycler
  - Valorisation de chaleur pour autres procédés

## RENDEMENT ENERGETIQUE BRUT

Société		Centre	
		Période	
		Année de base	
		Préparé par	Date

		<b>Production année en cours</b>
<b>Facteur de production</b>	<b>=</b>	<b>_____</b>
		<b>Production année de base</b>

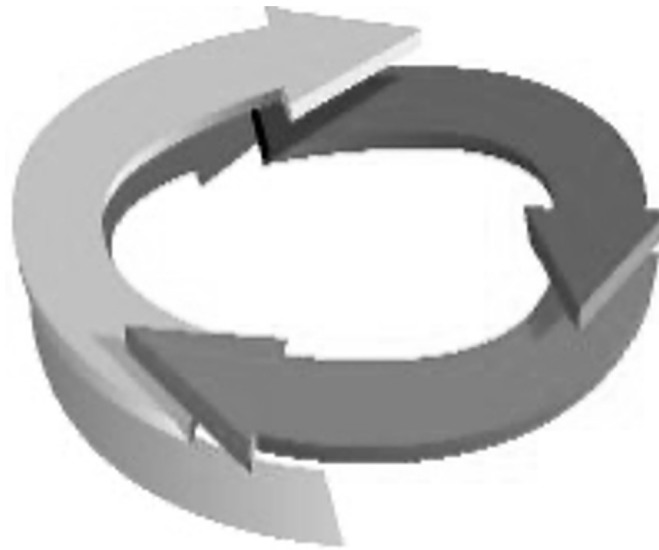
Equivalent de l'année de base = Energie de l'année de base x Facteur de production

<b>Rendement énergétique</b>		<b>Equivalent d'énergie année de base – Energie de l'année en cours</b>
	<b>=</b>	<b>_____</b>
<b>brut</b>		<b>Equivalent d'énergie de l'année de base</b>

## CALCUL DES ECONOMIES

CALCUL DES ECONOMIES						
Société				Centre		
				Période		
				Préparé par		Date
	(1) Consommation d'énergie imputée (MJ)	(2) Consommation d'énergie réelle (MJ)	(3) = (1) - (2) Economies d'énergie (MJ)	(4) Prix moyen de l'énergie (Dhs)	(5) = (3) x (4) Economies de dépenses (Dhs)	(6) Total économisé (Dhs)
Année de base						
AB + 1						
AB + 2						
AB + 3						

# BILANS ENERGETIQUES



# Bilan énergétique

Désagrégation: subdiviser la consommation, la demande et les coûts énergétiques en éléments

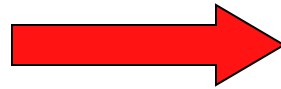
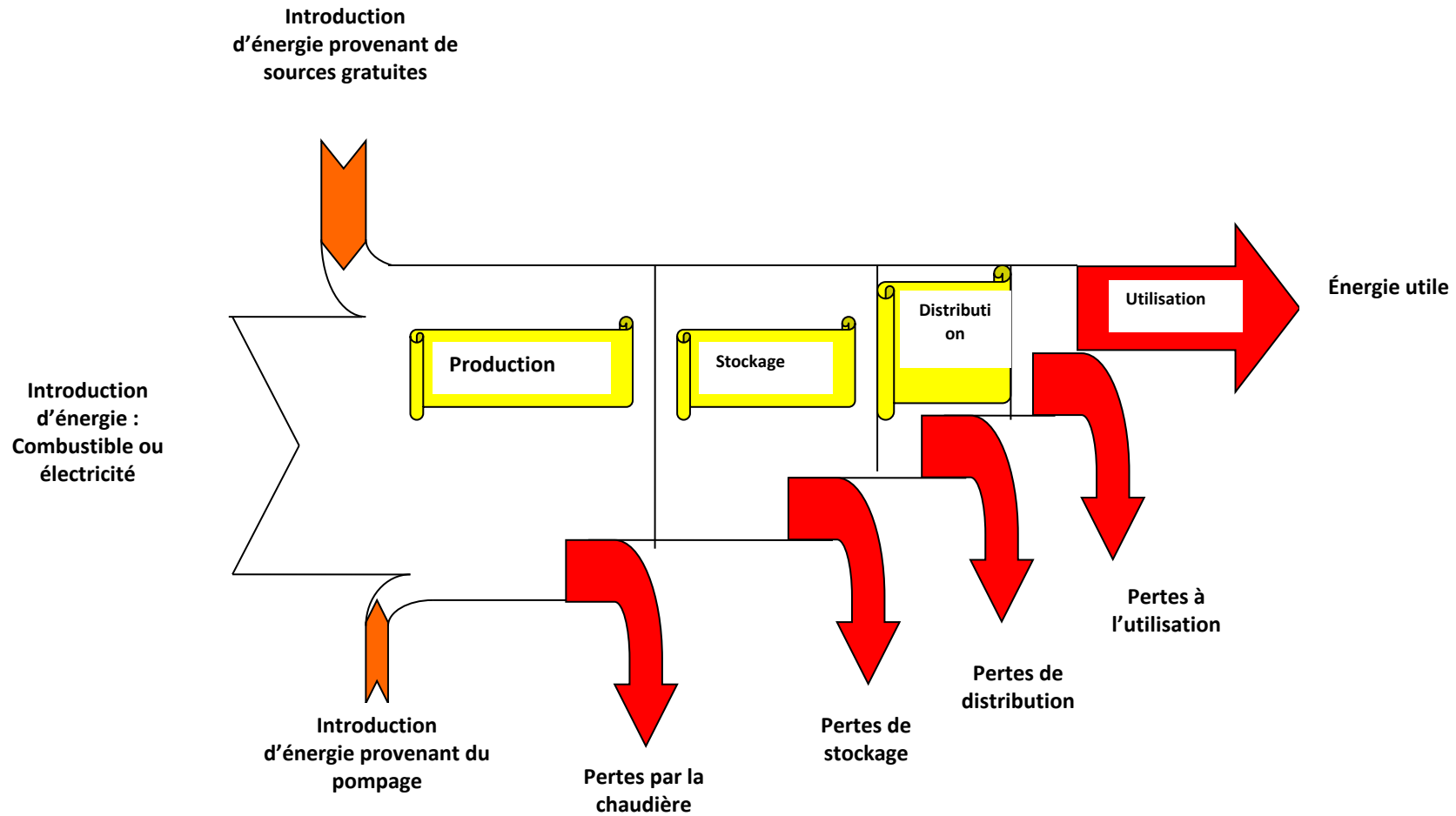
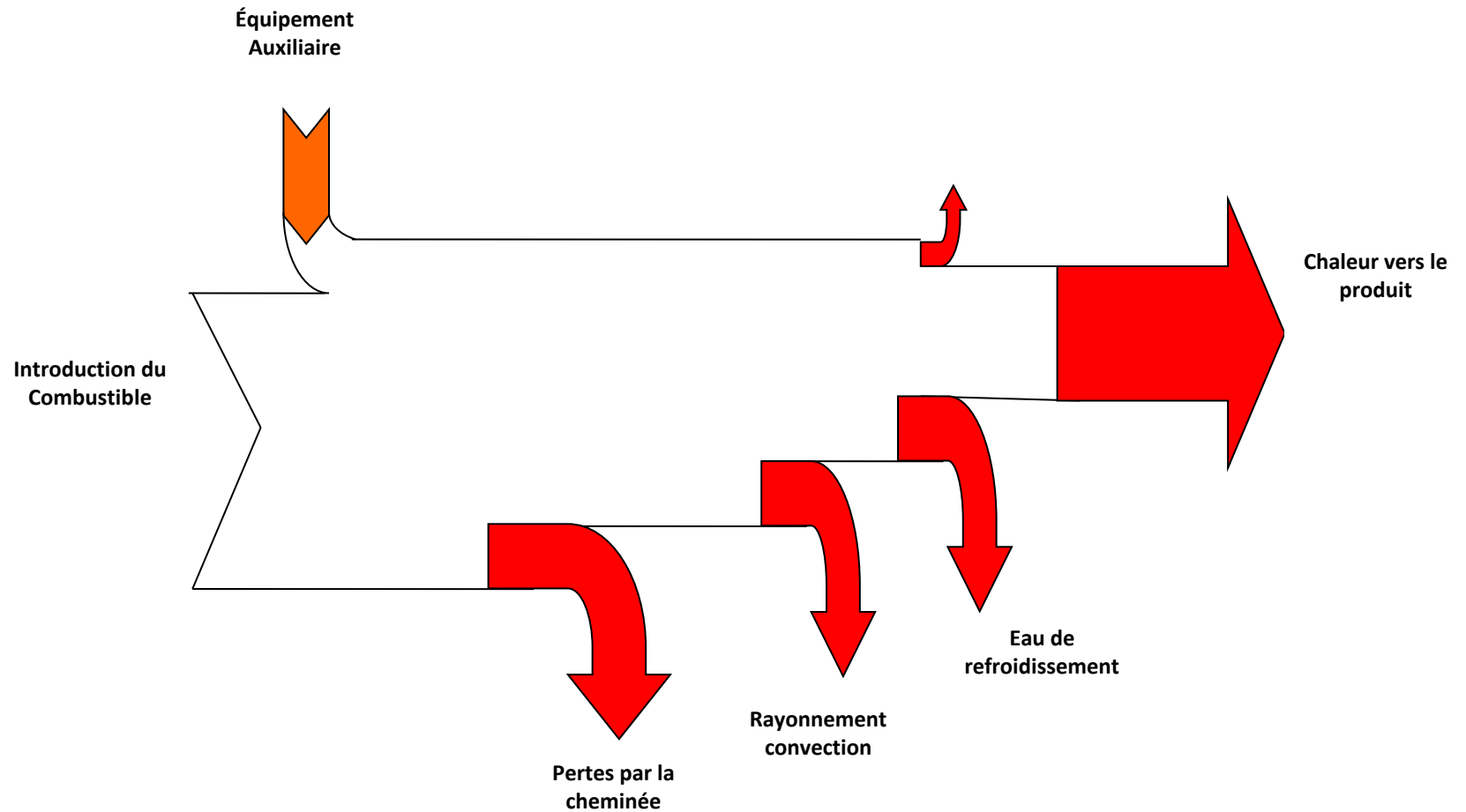


Diagramme de Sankey



## EAU CHAUDE ET FROIDE



# FOURS, SECHEURS, FOURS DE CUISSON

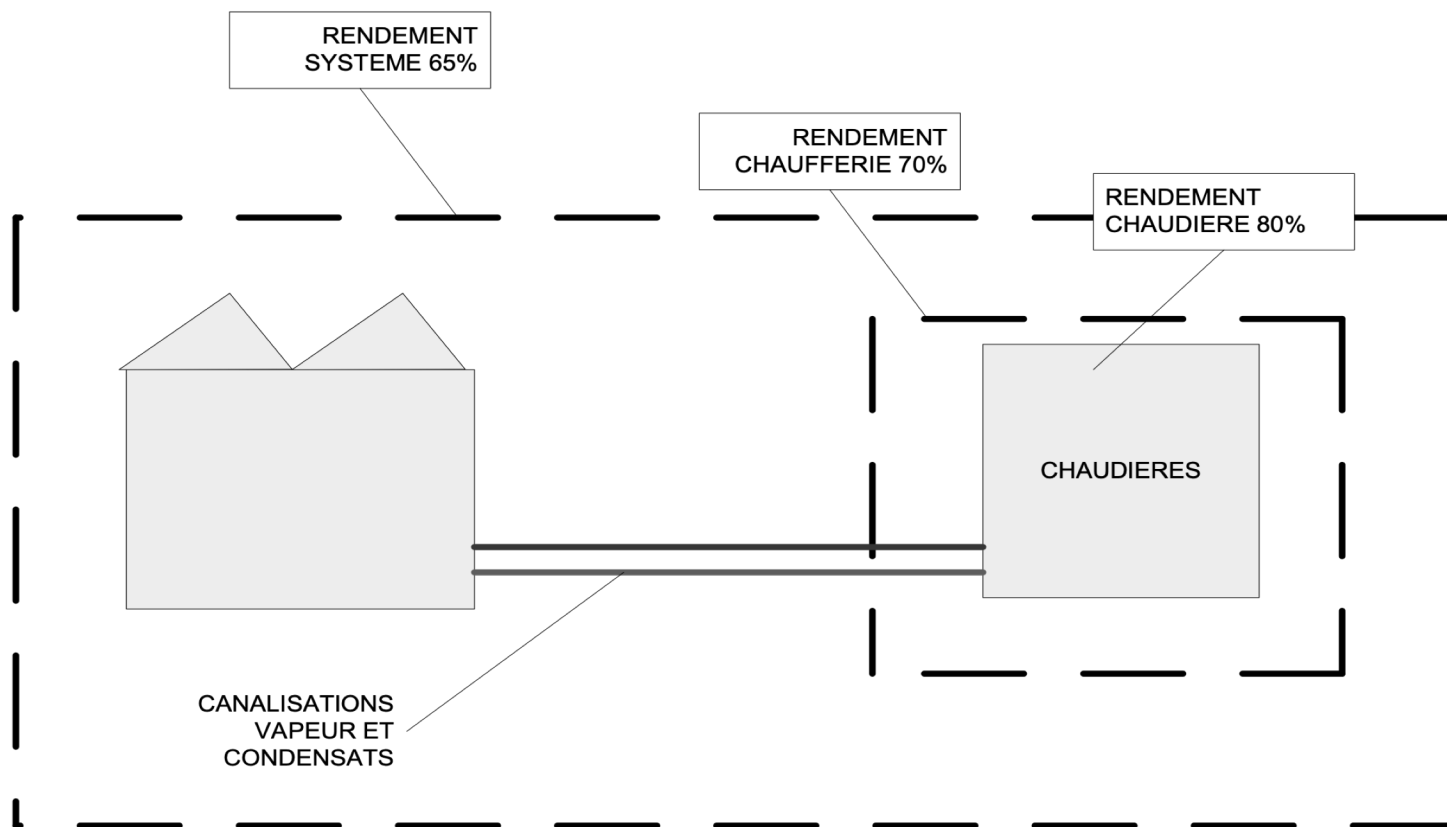
## Cout brut et cout de l'énergie utilisable

$$\text{cout.énergie.utilisable} = \frac{\text{cout.brut.100}}{\text{rendement}}$$

Fuel livré : 3000 Dhs/t ou 7.5 centimes/MJ

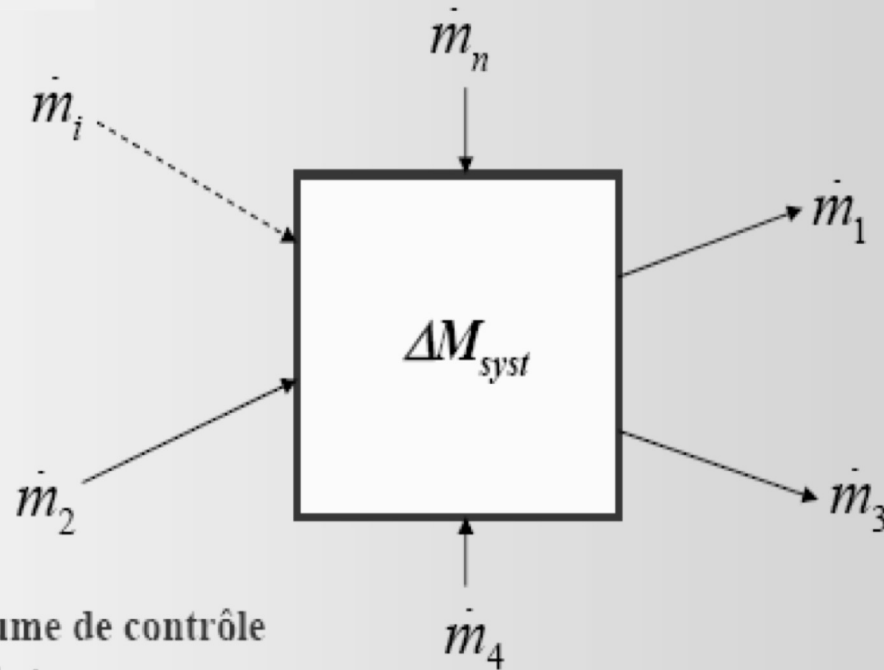
Rendement chaudière : 80 %

**Cout énergie utilisable = 9.34 centimes/MJ**



**Le rendement du système varie aussi en fonction de la charge imposée**

# 1. Bilan de masse



Choix du volume de contrôle

- Débit entrant +
- Débit sortant -

Conservation de la masse :

$$\Delta M_{syst} = \left( \sum_{i=1}^n \dot{m}_i \right) \Delta t$$

Régime permanent :

$$\sum_{i=1}^n \dot{m}_i = 0$$

**Attention aux mesures de débit : REGIME PERMANENT !**

# Cas d'étude : STATION DE POMPAGE

Input d'énergie :

Transformation d'énergie :

! Puissance mécanique :

$$P_{\text{méc}} = \eta_{\text{moteur}} \cdot P_{\text{el}} = 0.95 \times 49.5 = 47 \text{ kW}$$

! Puissance utile :

$$P_{\text{utile}} = Q_m \cdot \frac{\Delta P}{\rho} = 100 \times 3 \cdot 10^5 / 1000 = 30 \text{ kW}$$

! Perte d'énergie mécanique (fluide)

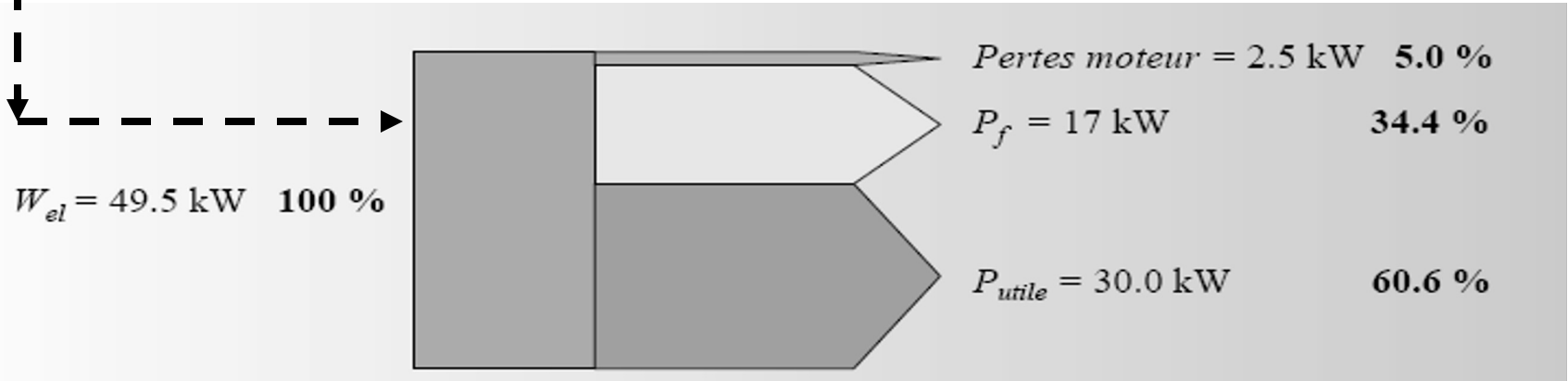
$$P_f = P_{\text{méc}} - P_{\text{utile}} = 17 \text{ kW}$$

! Augmentation de température

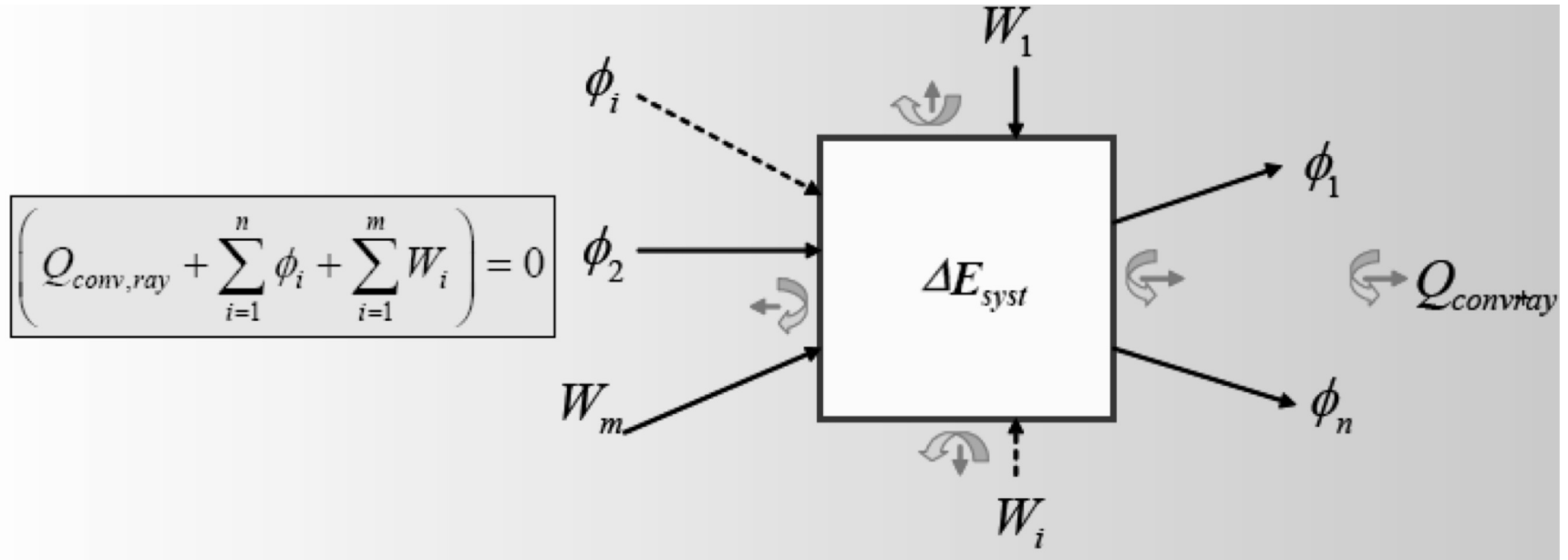
$$\Delta T = 0.11^\circ \text{C}$$

$$P_{\text{el}} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = 49.5 \text{ kW}$$

$$W_m = \Delta H = C_p \Delta T$$



## 2. Bilan d'énergie

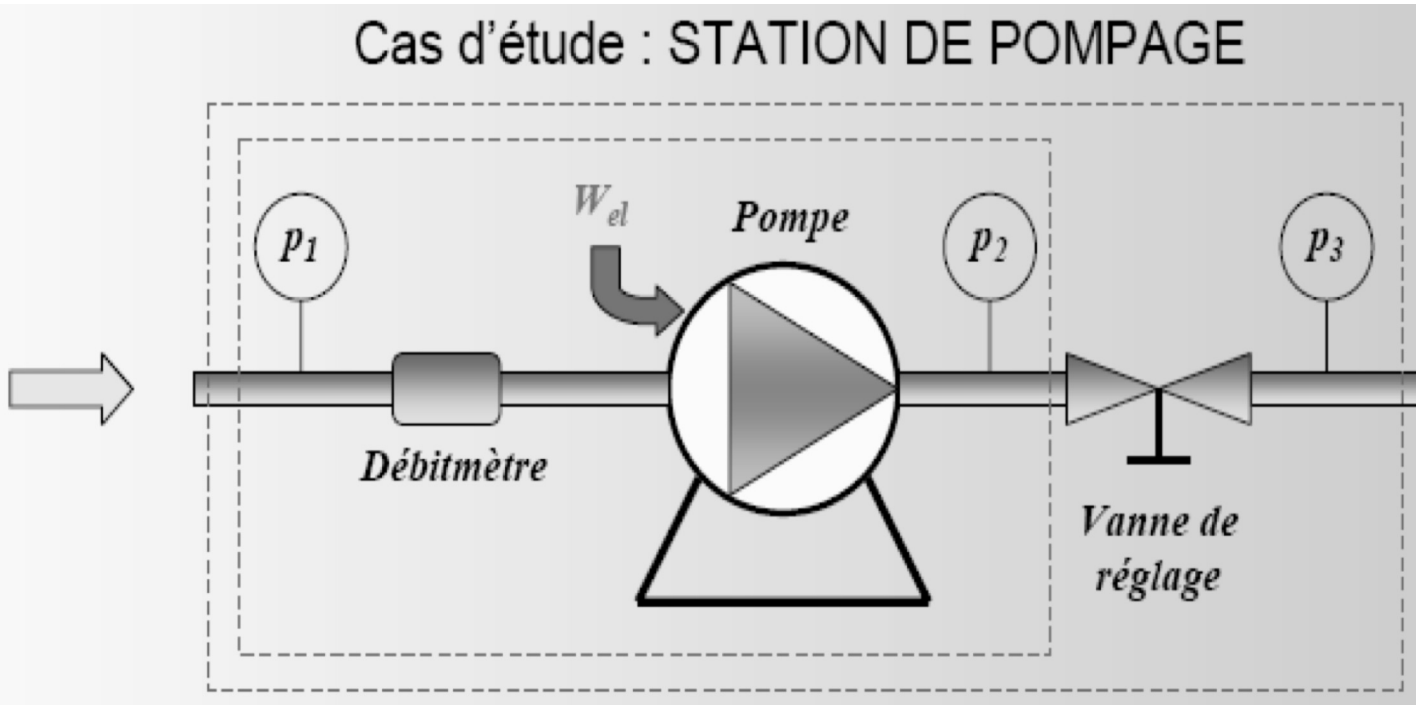


**Importance du choix du volume de contrôle :**

- Choix arbitraire
- Mais choix judicieux en fonction de l'application

***Attention aux mesures : REGIME PERMANENT !***

### 3. Diagramme de Sankey



#### Mécanique

- $Q_m = 100 \text{ kg/s}$  (360 m<sup>3</sup>/h)
- $p_1 = 1 \text{ bar}$
- $p_2 = 4 \text{ bar}$
- $p_3 = 2.5 \text{ bar}$

#### Résultats de mesures

#### Électrique

- $U = 380 \text{ V}$
- $I = 75 \text{ A}$
- Alimentation triphasé

## Cas d'étude : STATION DE POMPAGE

Input d'énergie :

Puissance mécanique :

$$P_{\text{méc}} = \eta_{\text{moteur}} \cdot P_{\text{el}} = 0.95 \times 49.5 = 47 \text{ kW}$$

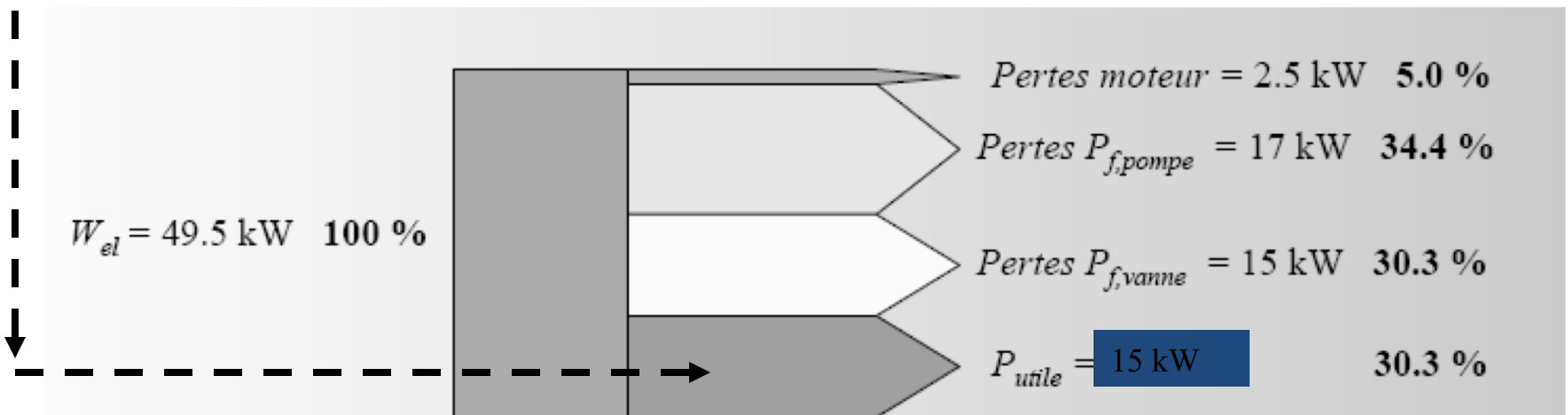
Puissance utile :

$$P_{\text{utile}} = Q_m \frac{\Delta P}{\rho} = 100 \times 1.5 \cdot 10^5 / 1000 = 15 \text{ kW}$$

Perte d'énergie

mécanique vanne:

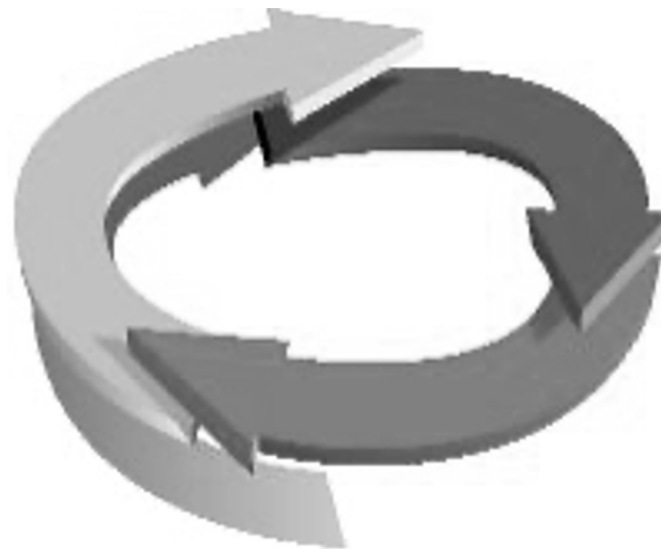
$$P_{\text{vanne}} = Q_m \cdot \frac{\Delta P}{\rho} = 15 \text{ kW}$$
$$P_{\text{el}} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = 49.5 \text{ kW}$$



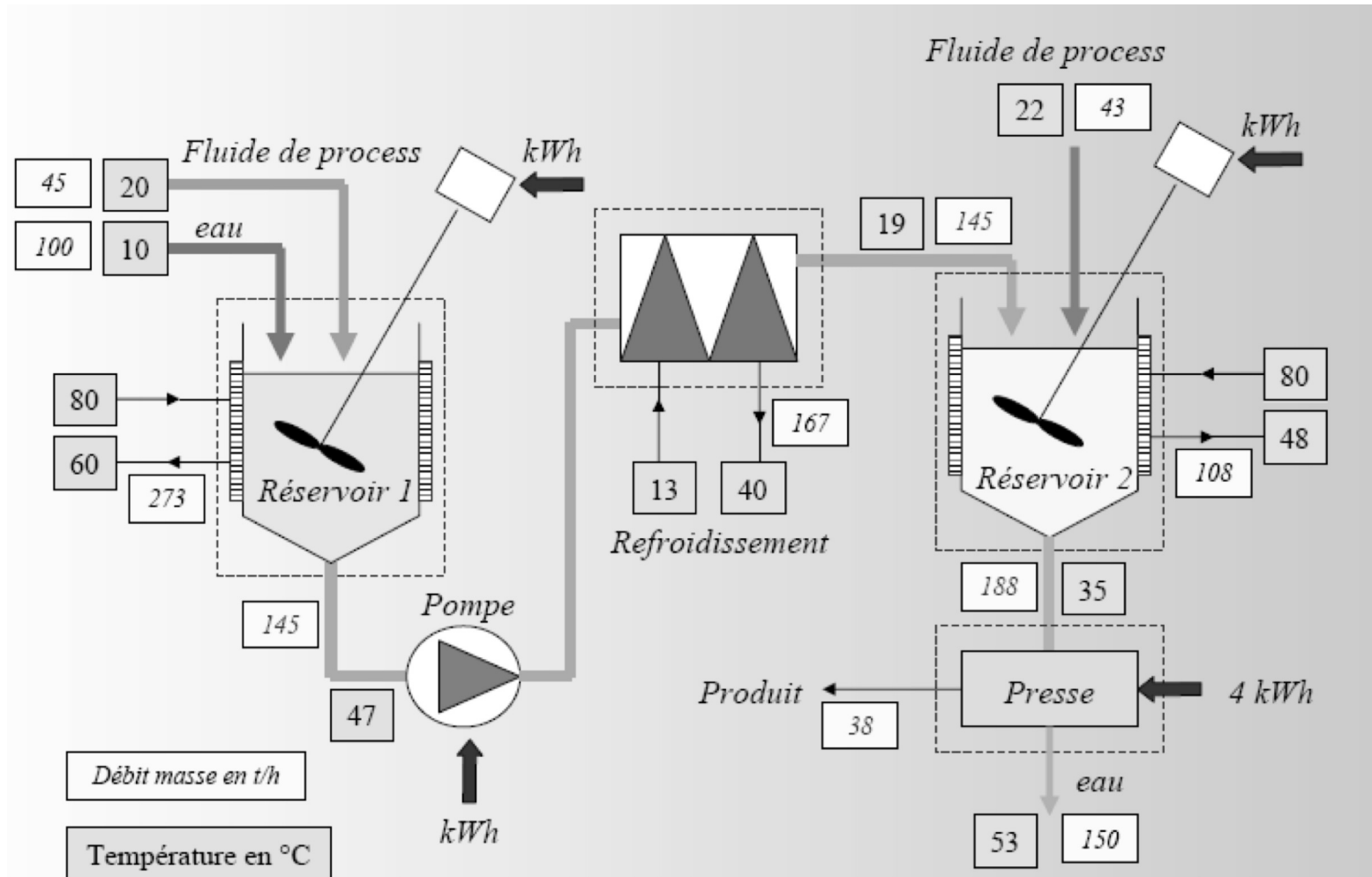
# Conclusions

- **Design et connaissance du circuit aéraulique (résistance)**
- **Les vannes de réglage sont « énergétivores » .**
- **Utilisation pour le réglage fin de débit**
- **Si le besoin en eau est constant  $\Rightarrow$  changer le moteur de la pompe ...**
- **Sinon  $\Rightarrow$  analyse de la monotone de charge**
- **Utilisation d'un variateur de fréquence...**

## USAGES SIGNIFICATIFS



# Cas d'étude : PAPETERIE



# PAPETERIE : Bilan global

- **INPUT d'énergie**

## Réservoir 1 :

- Fluide de process :  $20 \times 45 \times 1.16$  1.044 kW
- Eau :  $10 \times 100 \times 1.16$  1.160 kW
- Chauffage :  $(80-60) \times 273 \times 1.16$  6.333 kW
- TOTAL : 8.537 kW

## Réservoir 2 :

- Fluide de process :  $22 \times 43 \times 1.16$  1.097 kW
- Chauffage :  $(80-48) \times 108 \times 1.16$  4.009 kW
- TOTAL 5.106 kW

Presse : 4.000 kW

**TOTAL : 17.643 kW**

- **OUTPUT d'énergie**

Refroidisseur :  $(40-13) \times 167 \times 1.16$  5.230 kW

Eau de décharge :  $53 \times 150 \times 1.16$  9.222 kW

Produit fini :  $53 \times 38 \times 1.16$  2.336 kW

**TOTAL : 16.788 kW**

**Différence d'énergie  
⇒ Pertes à  
l'ambiance 0.855 kW**

# Inventaire des inputs et outputs

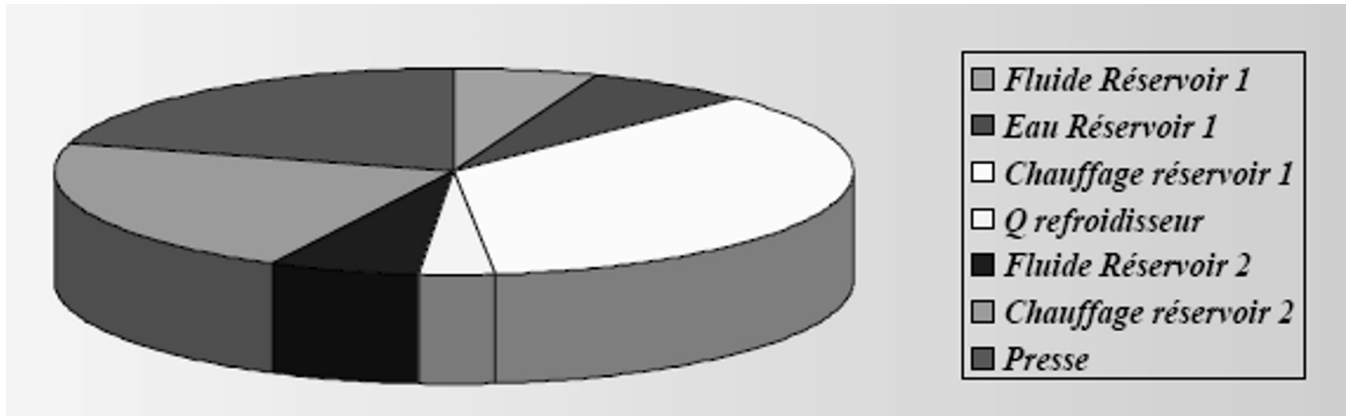
- Inputs d'énergie au processus**

Fluide de process au réservoir 1 :	1.044 kW	5.7 %
Eau au réservoir 1 :	1.160 kW	6.4 %
Chauffage réservoir 1 :	6.333 kW	34.9 %
Apport de l'ambiance au refroidisseur :	0.521 kW	2.9 %
Fluide de process au réservoir 2 :	1.097 kW	6.0 %
Chauffage réservoir 2 :	4.009 kW	22.1 %
Presse :	4.000 kW	22.0 %
	<b>TOTAL : 18.164 kW</b>	<b>100.0 %</b>

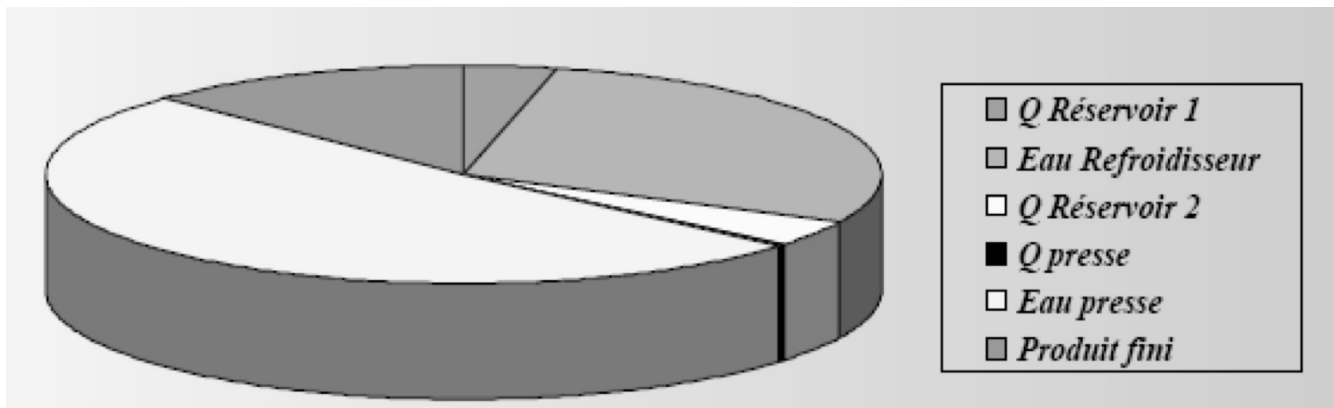
- Outputs d'énergie du processus**

Perte à l'ambiance réservoir 1 :	0.632 kW	3.5 %
Eau de refroidisseur :	5.230 kW	28.8 %
Perte à l'ambiance réservoir 2 :	0.669 kW	3.7 %
Perte à l'ambiance de la presse :	0.075 kW	0.4 %
Eau provenant de la presse :	9.222 kW	50.7 %
Produit fini :	2.336 kW	12.9 %
	<b>TOTAL : 18.164 kW</b>	<b>100.0 %</b>

## Partition des inputs d'énergie



## Partition des outputs d'énergie



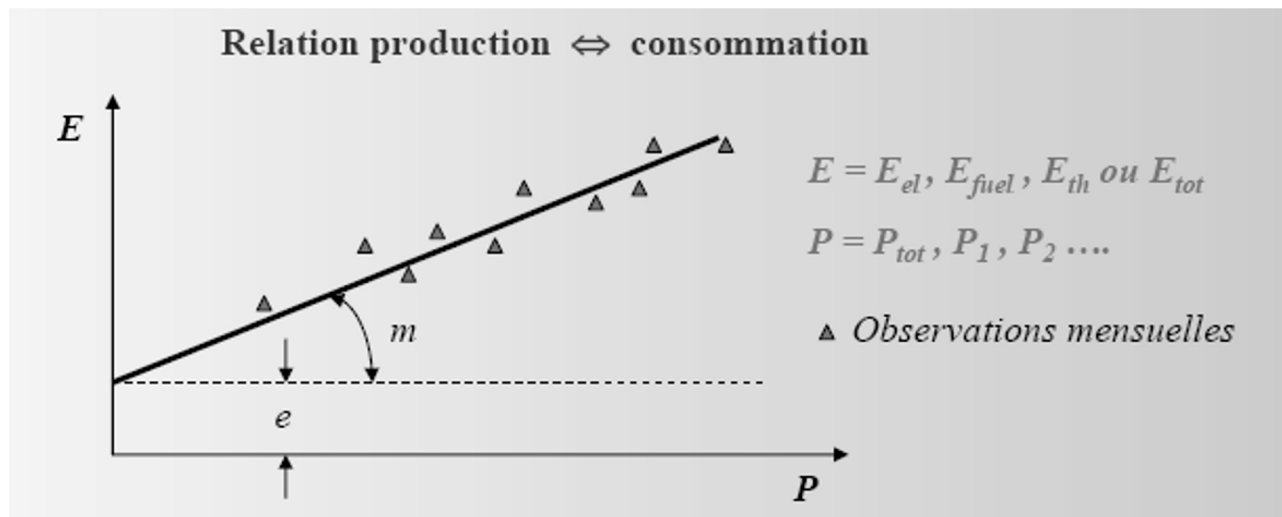
# **Consommation spécifique**

## **Collecte et suivi des données énergétiques**

1. Relation entre production et consommation énergétique
2. Consommation spécifique en fonction de la production
3. Exemples : Analyse de résultats - Améliorations

# 1. Relation entre production et consommation énergétique

- Temps d'observation  $\Rightarrow$  type d'industrie  $\Rightarrow$  période mensuelle
- Production : inventaire par type de produits  $P$
- Consommation (Inputs) : inventaire par type d'énergie
  - Énergie électrique en kWh  $\Rightarrow$  coût  $E_{el}$
  - Combustible en tonne ou m<sup>3</sup>  $\Rightarrow$  coût  $E_{fuel}$
  - Énergie thermique en GJ  $\Rightarrow$  coût  $E_{th}$
  - Coût total :  $E$



## Relation production $\Leftrightarrow$ consommation : linéaire ?

$$E = e + m \cdot P$$

### Terme indépendant $e$ : non lié à la production

- Intendance externe à la production : éclairage, climatisation et chauffage, électricité...
- Consommation d'énergie non liées à la production : circuit vapeur, structure chaudière ...

### Pente $m$ de la droite : directement liée à la production

- Besoin de vapeur pour le process (textiles, papiers, pétro-chimie ...)
- Consommation de combustible...
- Chaleur de réaction de processus chimique
- Four à induction : électricité ...

# Analyse de la relation entre production et consommation

- **$e$  trop grand** : pertes d'énergie non productive
  - ⇒ amélioration de l'isolation des surfaces chaudes
  - ⇒ remplacement ou amélioration du système d'éclairage
  - ⇒ amélioration du système de climatisation ou de chauffage
  - ⇒ etc...
- **$m$  trop grand** : énergie spécifiquement consommée dans le process
  - ⇒ système de récupération de chaleur
  - ⇒ modification du process proprement dit
- **Écart par rapport à la droite : sens de la courbure ...**

## Méthode de diagnostic :

- **Comparaison avec les données internes**

- ⇒ nécessité de maintenir à jour les relevés de production et de *consommation*

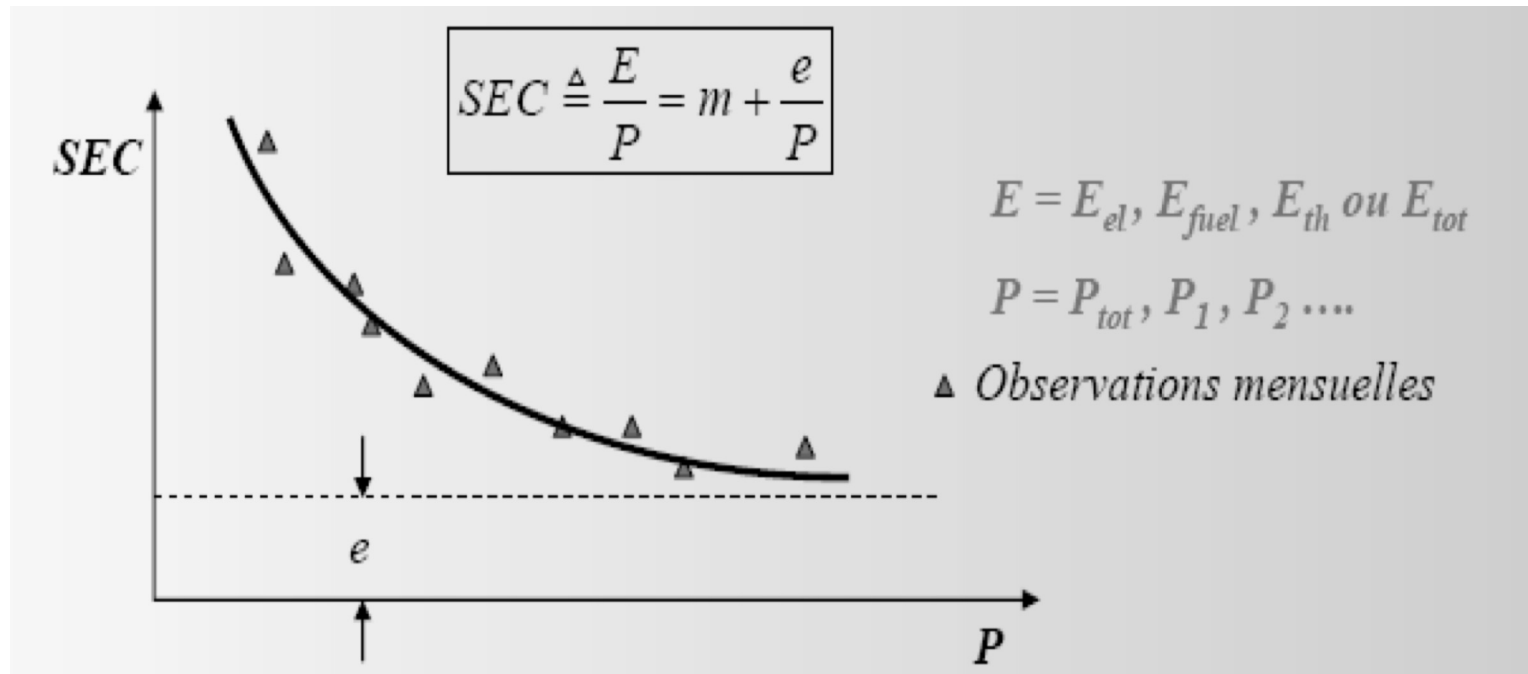
- ⇒ nécessité de maintenir à jour toutes les données statistiques.

- **Comparaison avec d'autres unités de production (concurrence !)**

- ⇒ difficile à obtenir directement : littérature spécialisée

- ⇒ analyse du prix de revient de la concurrence ?

## 2. Consommation spécifique d'énergie *SEC*



### 3. Exemple 1

- **Données**

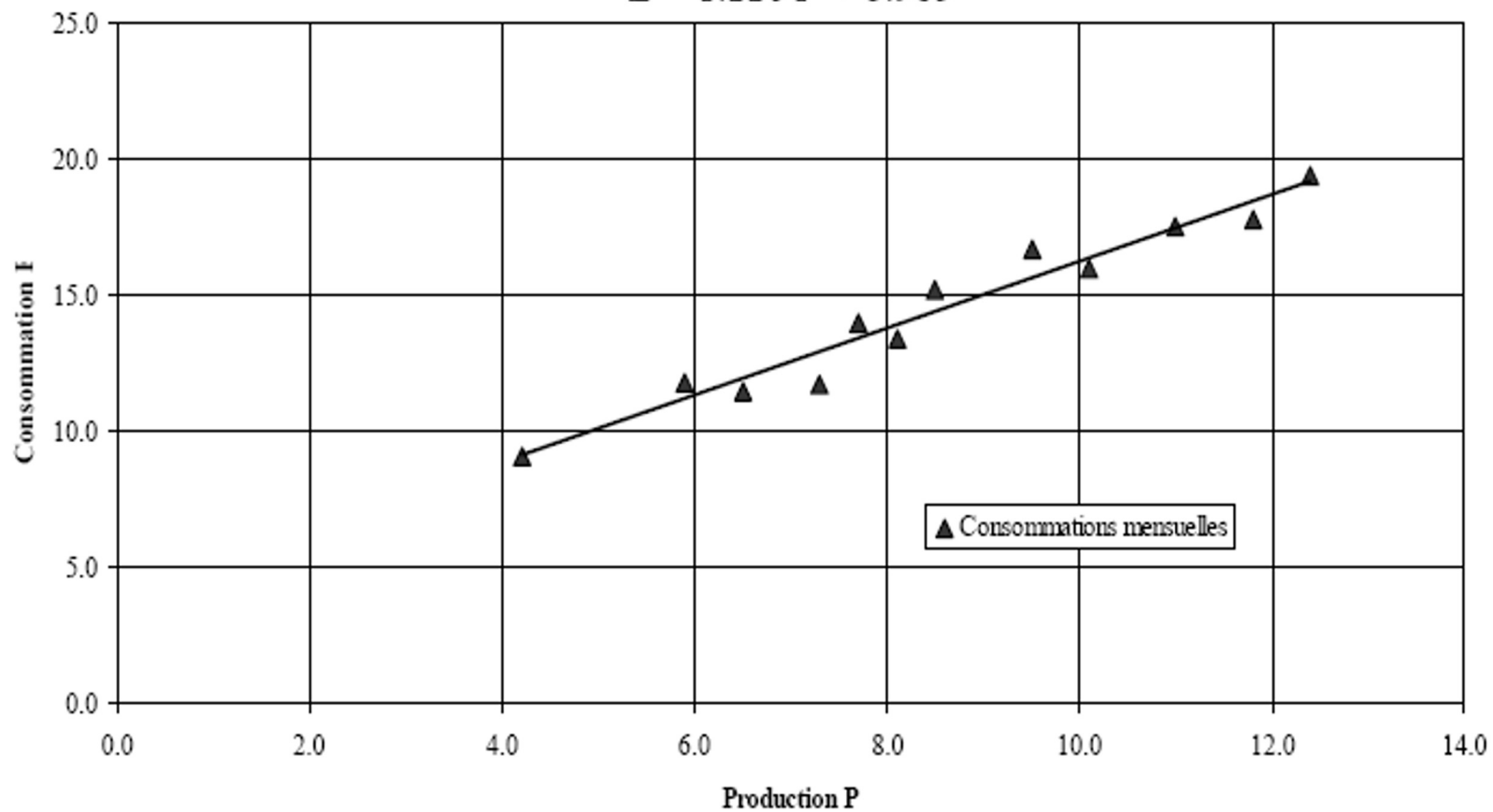
<i>Mois</i>	<i>P</i>	<i>E</i>	<i>SEC</i>	<i>E estimé</i>	<i>Ecart</i>
1	6.5	11.5	1.77	11.95	0.45
2	10.1	16.0	1.58	16.37	0.37
3	4.2	9.1	2.17	9.13	0.03
4	8.5	15.2	1.79	14.41	-0.79
5	5.9	11.8	2.00	11.22	-0.58
6	8.1	13.4	1.65	13.92	0.52
7	11.0	17.5	1.59	17.47	-0.03
8	12.4	19.4	1.56	19.19	-0.21
9	11.8	17.8	1.51	18.45	0.65
10	7.3	11.7	1.60	12.93	1.23
11	9.5	16.7	1.76	15.63	-1.07
12	7.7	14.0	1.82	13.43	-0.57
<i>Moyenne</i>	<i>8.6</i>	<i>14.5</i>	<i>1.73</i>		<i>0.68</i>

- **Questions**

- *Quel est le meilleur et plus mauvais mois ?*
- *Quelle est la production moyenne et la consommation moyenne ?*
- *Quelle est la consommation fixe ?*
- *Globalement les résultats sont-ils bons ?*

**Relation production - consommation**

$$E = 1.226 P + 3.985$$



## 3. Exemple 2

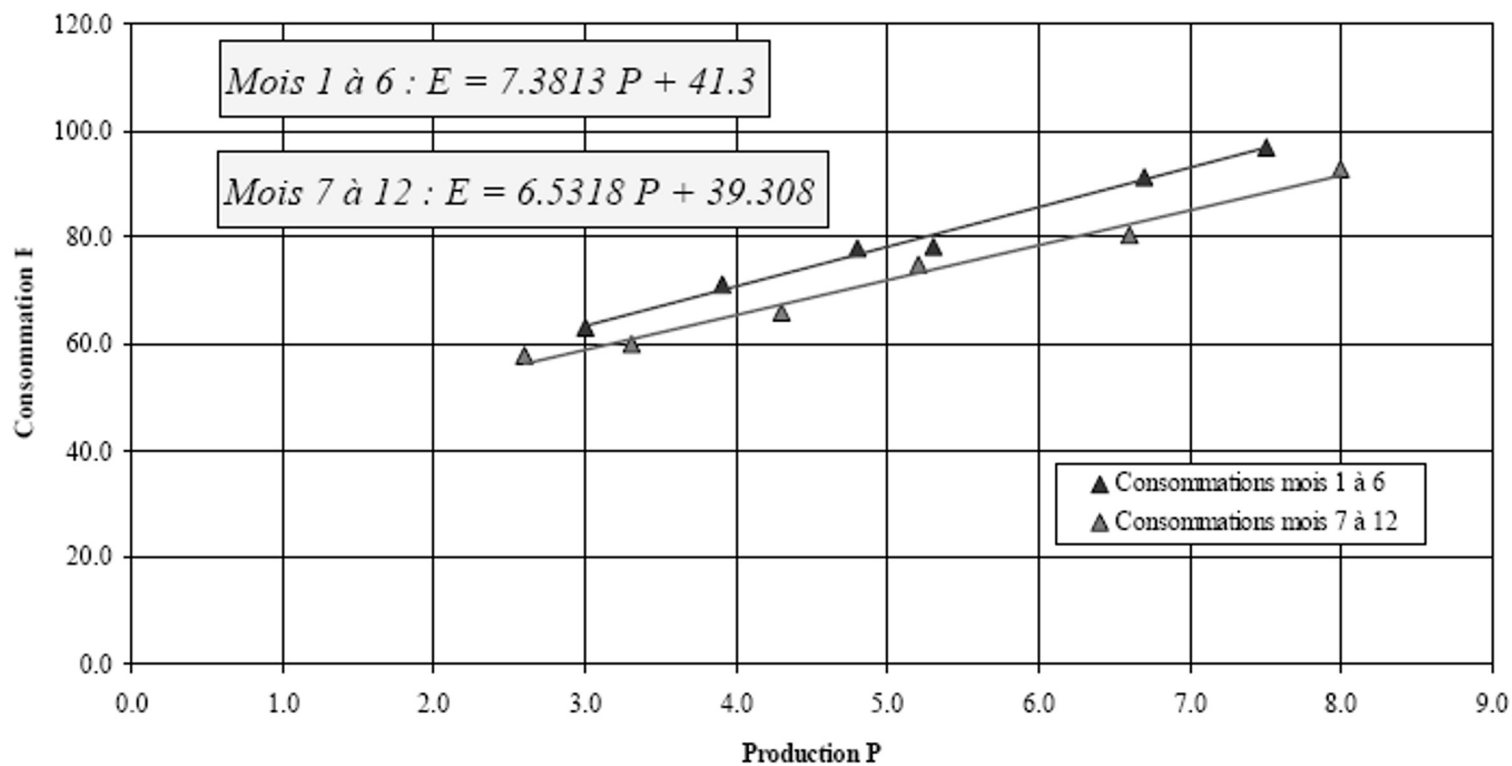
- **Données**

<i>Mois</i>	<i>P</i>	<i>E</i>	<i>SEC</i>	<i>E estimé</i>	<i>Ecart</i>
1	7.5	96.8	12.91	96.66	-0.14
2	4.8	77.8	16.21	76.73	-1.07
3	5.3	78.4	14.79	80.42	2.02
4	3.0	63.0	21.00	63.44	0.44
5	6.7	91.1	13.60	90.75	-0.35
6	3.9	71.0	18.21	70.09	-0.91
<i>Moyenne</i>	<i>5.2</i>	<i>79.7</i>	<i>16.1</i>		<i>1.13</i>
7	2.6	57.7	22.19	56.29	-1.41
8	5.2	74.9	14.40	73.27	-1.63
9	6.6	80.5	12.20	82.42	1.92
10	4.3	65.8	15.30	67.39	1.59
11	8.0	92.8	11.60	91.56	-1.24
12	3.3	60.1	18.21	60.86	0.76
<i>Moyenne</i>	<i>5.0</i>	<i>72.0</i>	<i>15.7</i>		<i>1.61</i>

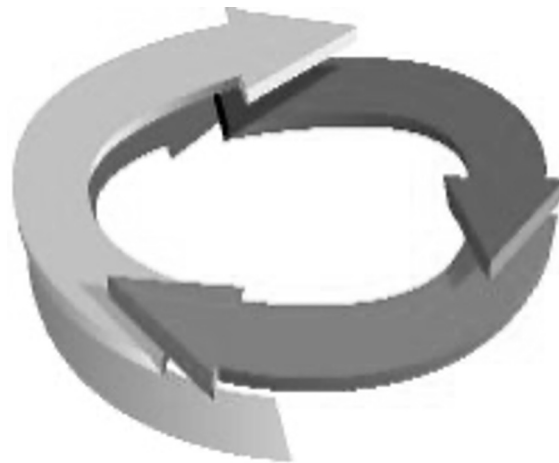
- **Questions**

- *Quel est le gain du nouveau système de récupération d'énergie ?*
- *Quel type de récupération ?*
- *Quel est le gain sur la consommation fixe ?*
- *Quelle conséquence lorsque la production est importante ?*

### Relation production - consommation



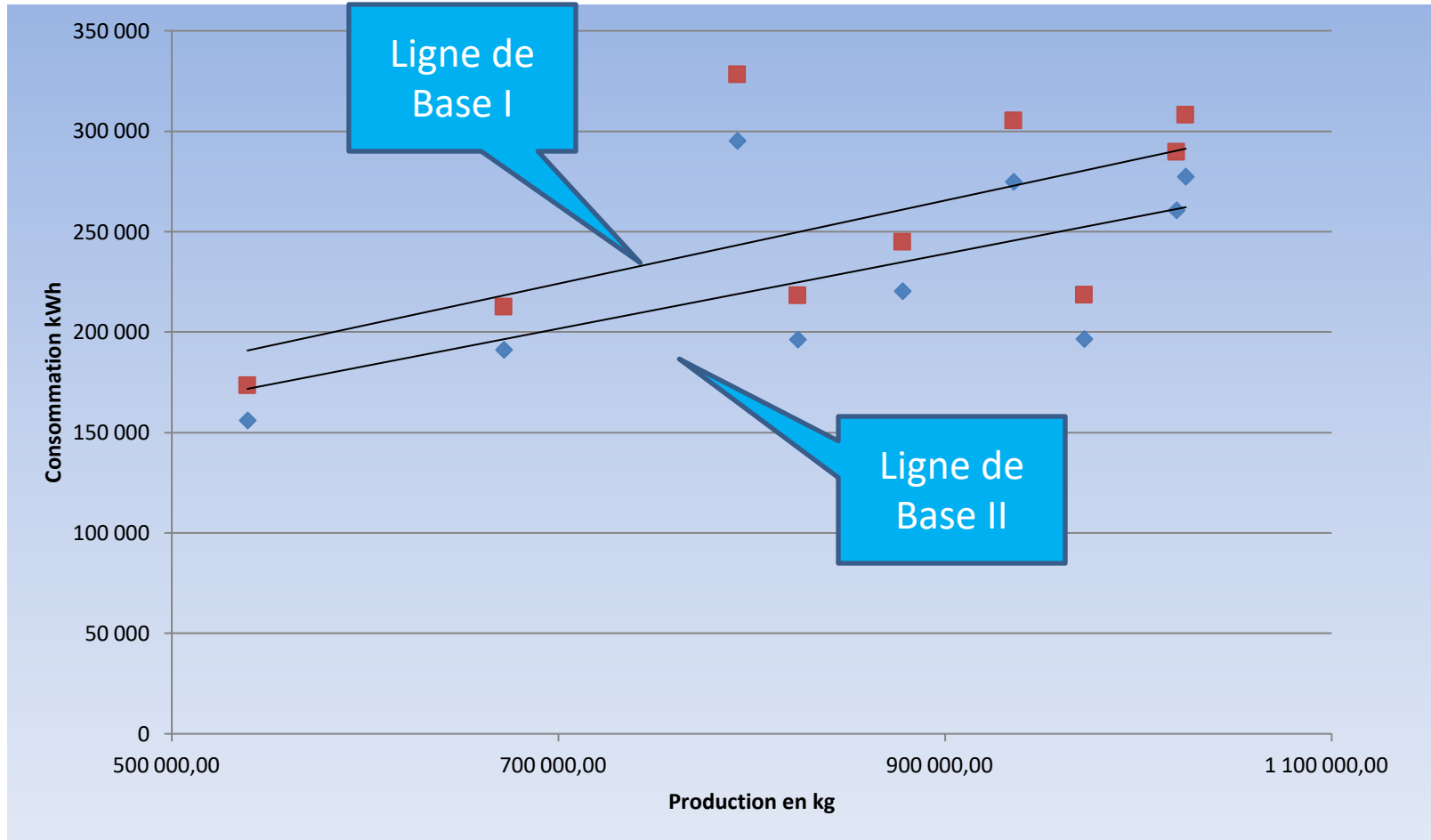
# BENCHMARKING



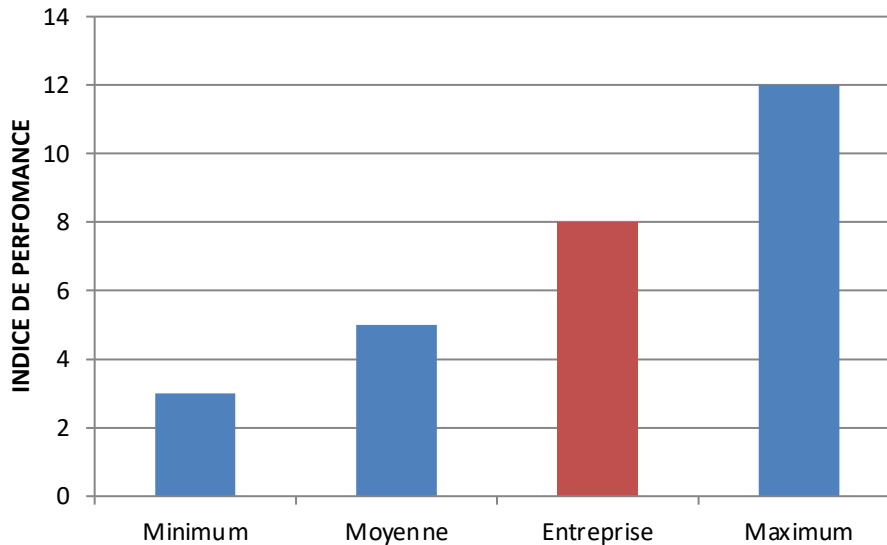
# indicateurs

Consommation spécifique (unité/tonne)	Indicateur (ligne de base)	Objectif
Matière première		
Eau		
Electricité		
Fioul		
Solvants		
Effluents liquides (DBO, DCO, métaux lourds etc...)		
Etc....		

# LIGNE DE BASE



# Benchmarking



Où ?

Où est ce que je me situe ?

Pourquoi ?

Pourquoi je suis à cette position par rapport aux autres ?

Comment ?

Comment je peux m'améliorer ?

# Autres indicateurs

