



# *L'audit énergétique et l'URE dans l'industrie*

## *Quelques Idées de base*

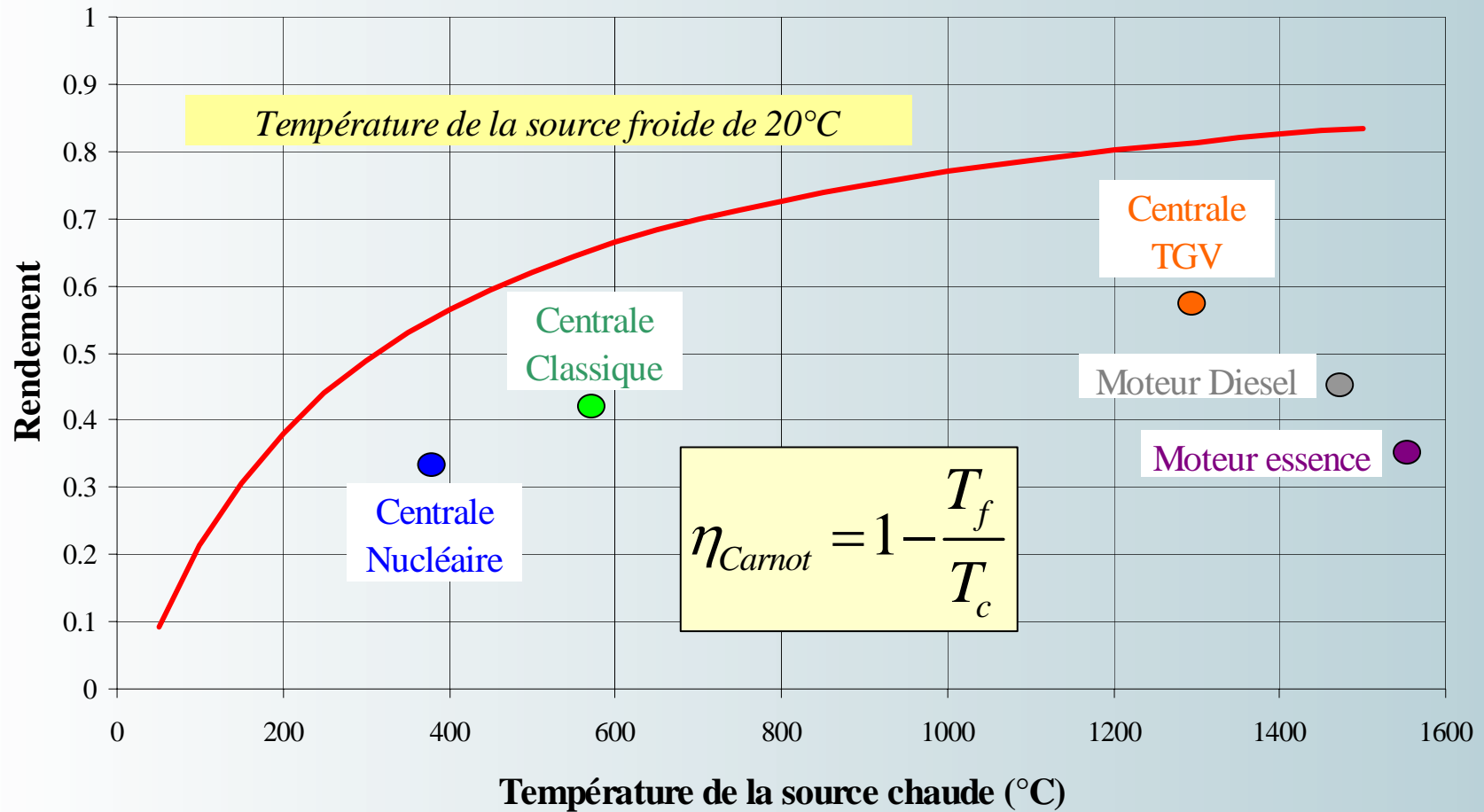
*Hervé JEANMART*  
*Jean-Marie SEYNHAEVE*





# Transformation ou transfert de l'énergie = Dégradation de l'énergie

## Rendement du cycle de Carnot





## Conséquences sur la gestion de l'énergie

Qualité de l'énergie thermique ?

$$\phi_{th} = q_m c_p T$$

- Capacité thermique du flux énergétique ( $q_m c_p$ )
- Niveau de température à laquelle l'énergie thermique est fournie



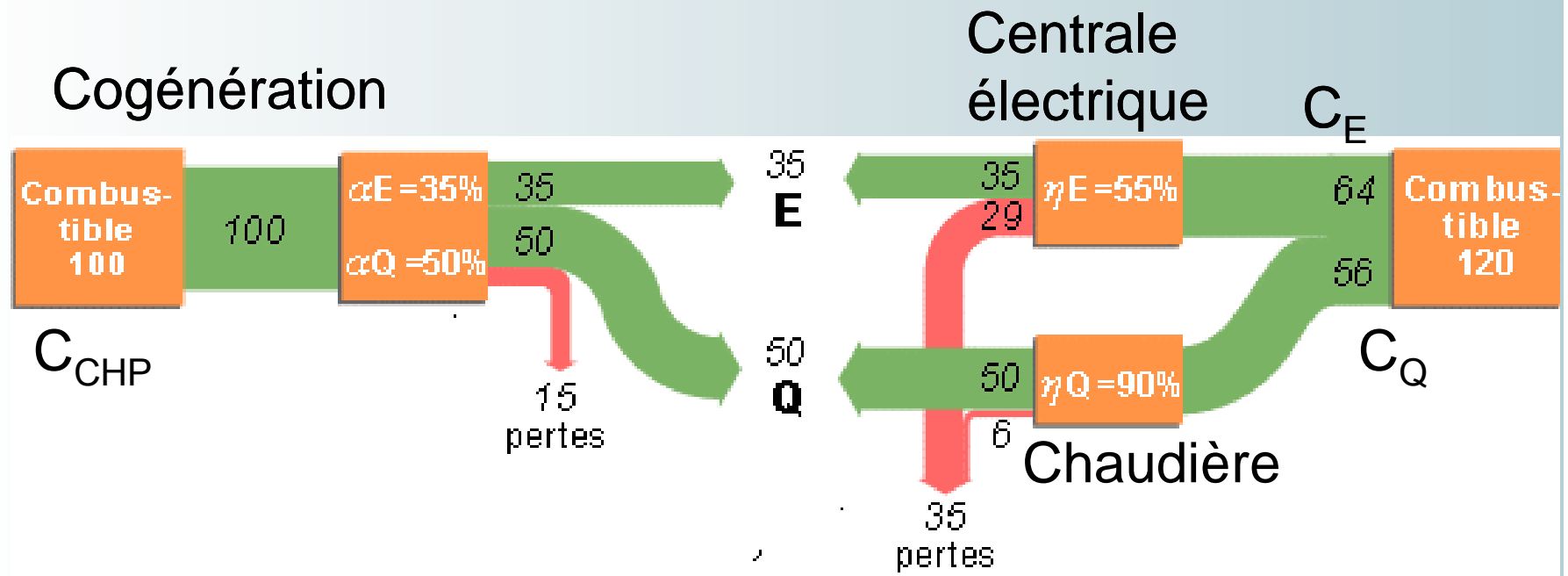
*Exergie : faculté de transformer l'énergie thermique en énergie mécanique compte tenu de la perte à la source froide*



*Intérêt de la cogénération  
Systèmes de production combinée Energie thermique et Electricité*



# Intérêt de la cogénération



## Conséquences sur la gestion de l'énergie

*Relation type d'énergie ↔ coût de l'énergie*

- Point de vue financier : énergie primaire et noble
  - Solaire, éolien, géothermie, marée, hydraulique, etc. : 0 €/kWh
  - Fossiles et électricité (pour usage domestique) : prix mai 2005

	PCI (kJ/kg)	€/MWh	Remarques
Bois (bûches)	18000	25.0 €	50 €/sterre de bois - une sterre = 400 kg mat. sèches
Charbon (Anthracite)	33000	27.9 €	256 €/T calibre 20/30
Mazout (chauffage)	35300	26.1 €	0.47 €/l masse volumique de 830 kg/m <sup>3</sup>
Gaz Naturel (pauvre)	31000	29.7 €	suit le cours du mazout, environ 10 % plus cher
Electricité jour	-	150.0 €	... ordre de grandeur
Electricité nuit	-	80.0 €	... ordre de grandeur
Revente au réseau	-	30.0 €	A vérifier : probablement fonction du marché

Usage industriel : prix très sensible aux contrats de fourniture

## Conséquences sur la gestion de l'énergie

*Relation type d'énergie ↔ coût de l'énergie*

- Point de vue environnemental : effet de serre
- Unité : kg de CO<sub>2</sub> par MWh
  - Solaire, éolien, géothermie, marée, hydraulique, etc. : ...0...  
sans compter les matériaux à mettre en œuvre...
  - Fossiles et électricité :

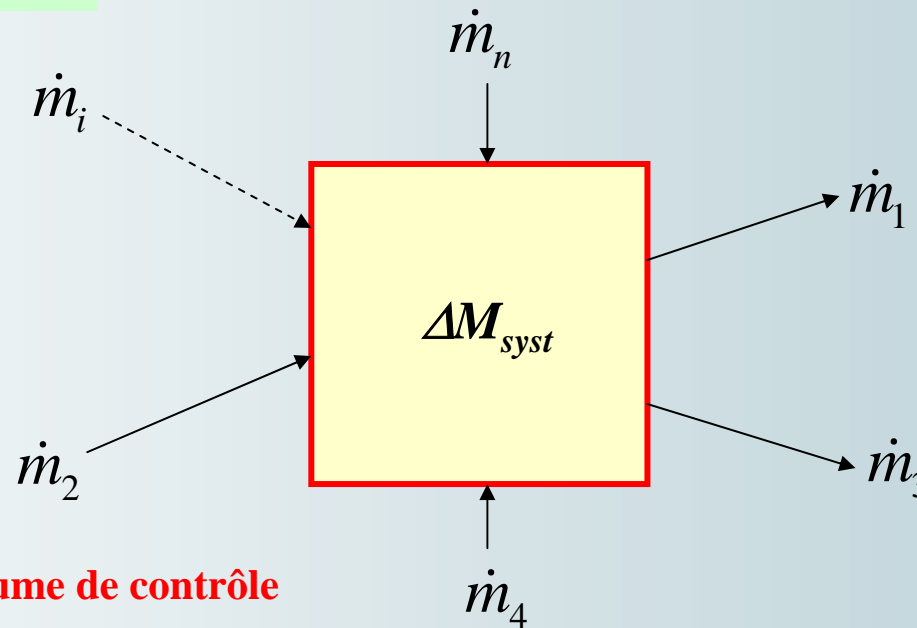
	(kg C/kg)	kg CO <sub>2</sub> /MWh	Remarques
Bois (bûches)	0.352	258	Basé sur une composition moyenne des essences de bois
Charbon (Anthracite)	0.899	360	Basé sur un anthracite moyen : (mat. Vol.) = 5 %
Mazout (chauffage)	0.876	328	Basé sur fioul moyen : 1.7 H pour 1 C
Gaz Naturel (pauvre)	0.618	263	Gaz de Slochteren à PCI = 31000 kJ/kg
Electricité TGV		478	Rendement centrale de 55 %
Electricité charbon		856	Rendement centrale de 42 %
Electricité hydraulique		négligeable	Coût en CO <sub>2</sub> des matériaux mis en oeuvre
Electricité Nucléaire		négligeable	Coût en CO <sub>2</sub> des matériaux mis en oeuvre

Le coût environnemental de l'électricité est fonction de la composition du parc de production : TGV, Charbon, Nucléaire, Hydraulique, etc.



# Audit énergétique : outils de bases

## 1. Bilan de masse



### Choix du volume de contrôle

- Débit entrant +
- Débit sortant -

Conservation de la masse :

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

Régime permanent :

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

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



# Audit énergétique : outils de bases

## 2. Bilan d'énergie

### Hypothèses pratiques :

- Les différences d'énergies potentielle et cinétiques sont négligées

$$\Delta z \cong 0 \quad \Delta K \cong 0$$

- Attention à la justification ...

### Types d'énergie :

- **Puissance électrique ...**
- **Puissance mécanique :  $W_i$  (W ou kW)**
- **Flux énergétique  $\phi_i$  (W ou kW)**

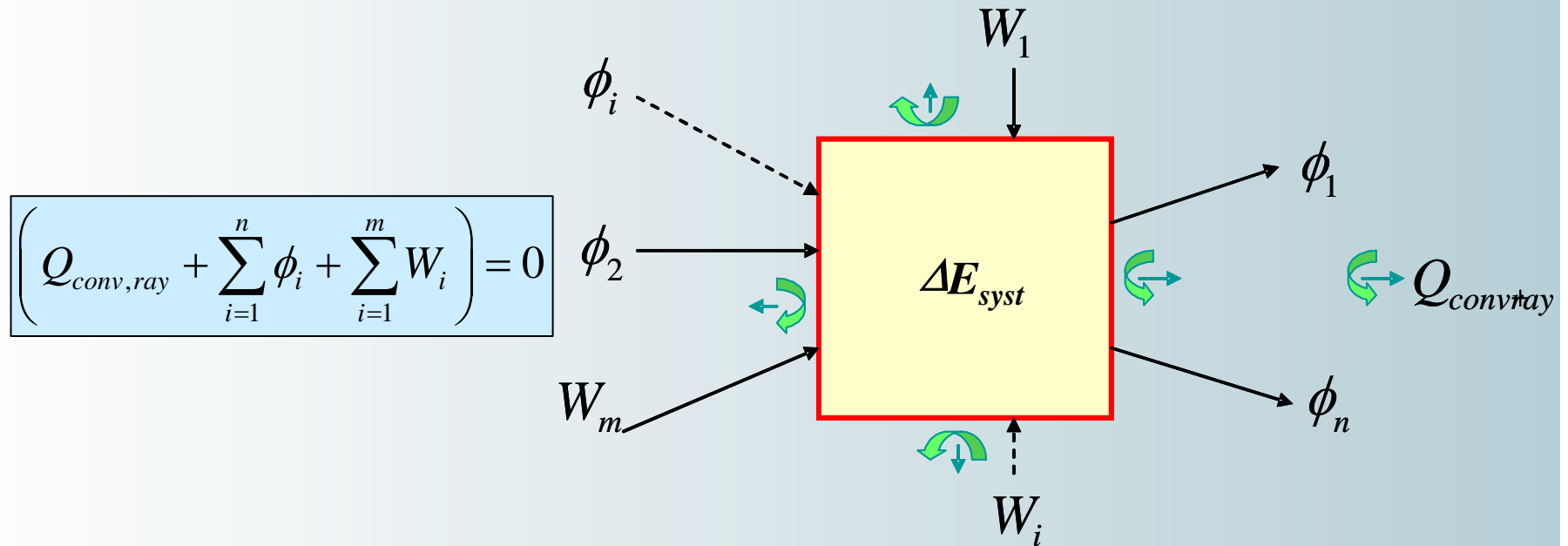
- Fluides :  $\phi = \dot{m}h = \dot{m}c_p t$

- Combustibles  $\phi = \dot{m}_c PCI(S)$

- **Flux de transfert de chaleur vers le milieu extérieur (W ou kW)**  $Q_{conv+ray}$

## Audit énergétique : outils de bases

### 2. Bilan d'énergie



#### Importance du choix du volume de contrôle :

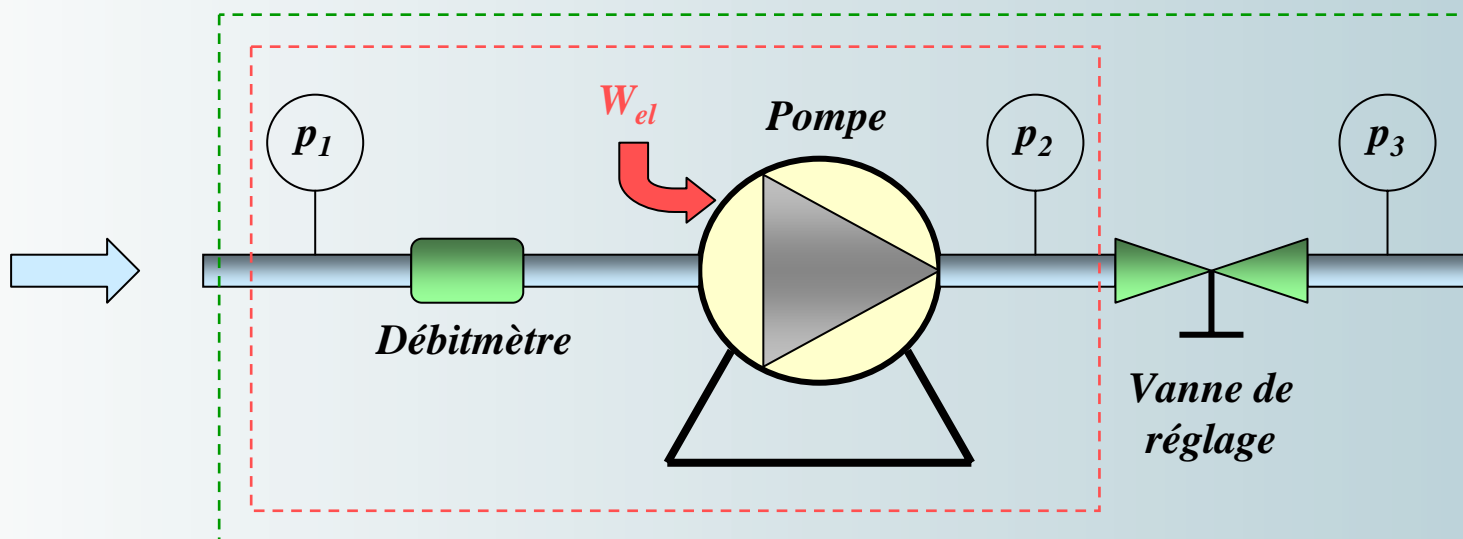
- Choix arbitraire
- Mais choix judicieux en fonction de l'application

**Attention aux mesures : REGIME PERMANENT !**

# Audit énergétique : outils de bases

## 3. Diagramme de Sankey

Cas d'étude : STATION DE POMPAGE



### Résultats de mesures

#### Mécanique

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

#### Électrique

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



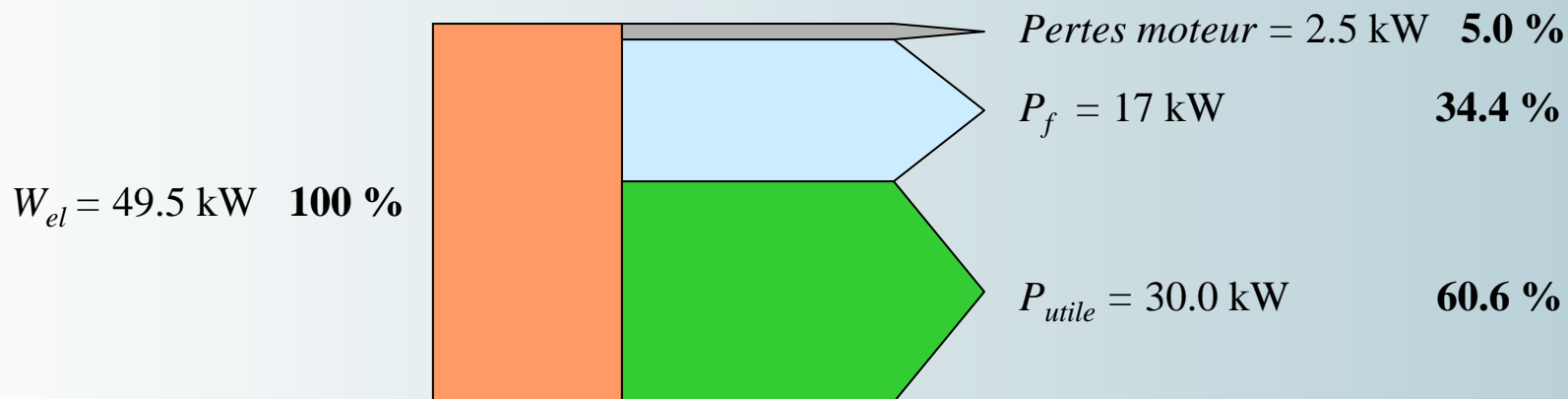
## Cas d'étude : STATION DE POMPAGE

Input d'énergie :  $P_{el} = \sqrt{3} \cdot UI = 49.5 \text{ kW}$

Volume de contrôle rouge

### Transformation d'énergie :

- Puissance mécanique :  $P_{méc} = \eta_{moteur} P_{el} = 0.95 \times 49.5 = 47.0 \text{ kW}$
- Puissance utile :  $P_{utile} = Q_m \frac{\Delta p}{\rho} = 100 \times 3.10^5 / 1000 = 30.0 \text{ kW}$
- Perte d'énergie mécanique  $\Rightarrow Q_{fluide} : P_f = P_{méc} - P_{utile} = 17.0 \text{ kW}$
- Augmentation de température :  $W_m \cong \Delta H = c_p \Delta T \quad \Delta T = 0.11 \text{ °C} !!!$



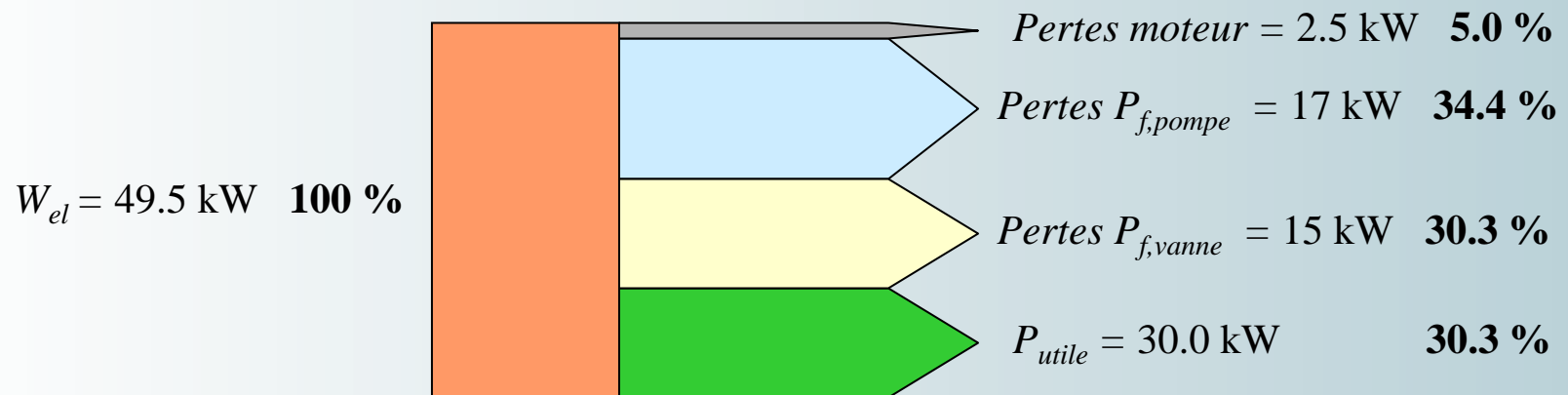
## Cas d'étude : STATION DE POMPAGE

### Volume de contrôle vert

**Input d'énergie :**  $P_{el} = \sqrt{3} \cdot UI = 49.5 \text{ kW}$

**Transformation d'énergie :**

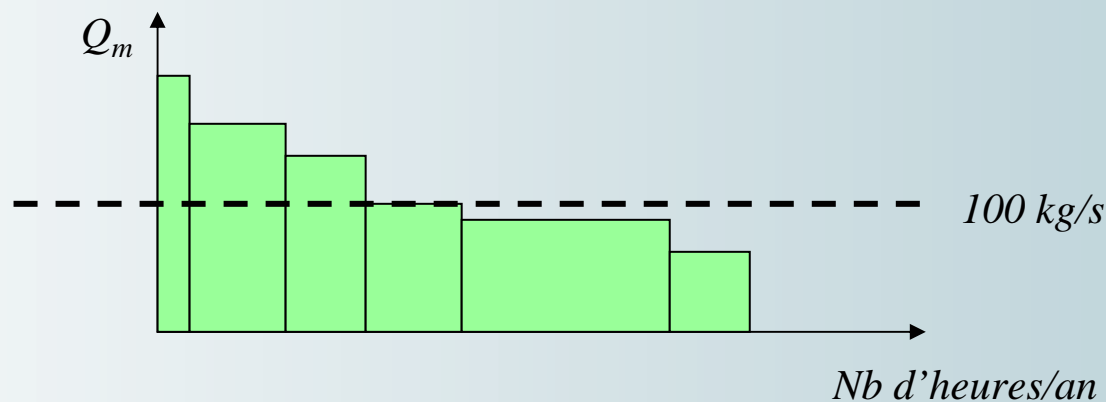
- Puissance mécanique :  $P_{méc} = \eta_{moteur} P_{el} = 0.95 \times 49.5 = 47.0 \text{ kW}$
- Puissance utile :  $P_{utile} = Q_m \frac{\Delta p_1^3}{\rho} = 100 \times 1.5 \cdot 10^5 / 1000 = 15.0 \text{ kW}$
- Perte d'énergie mécanique dans la vanne :  $P_{vanne} = Q_m \frac{\Delta p_3^2}{\rho} = 15.0 \text{ kW}$



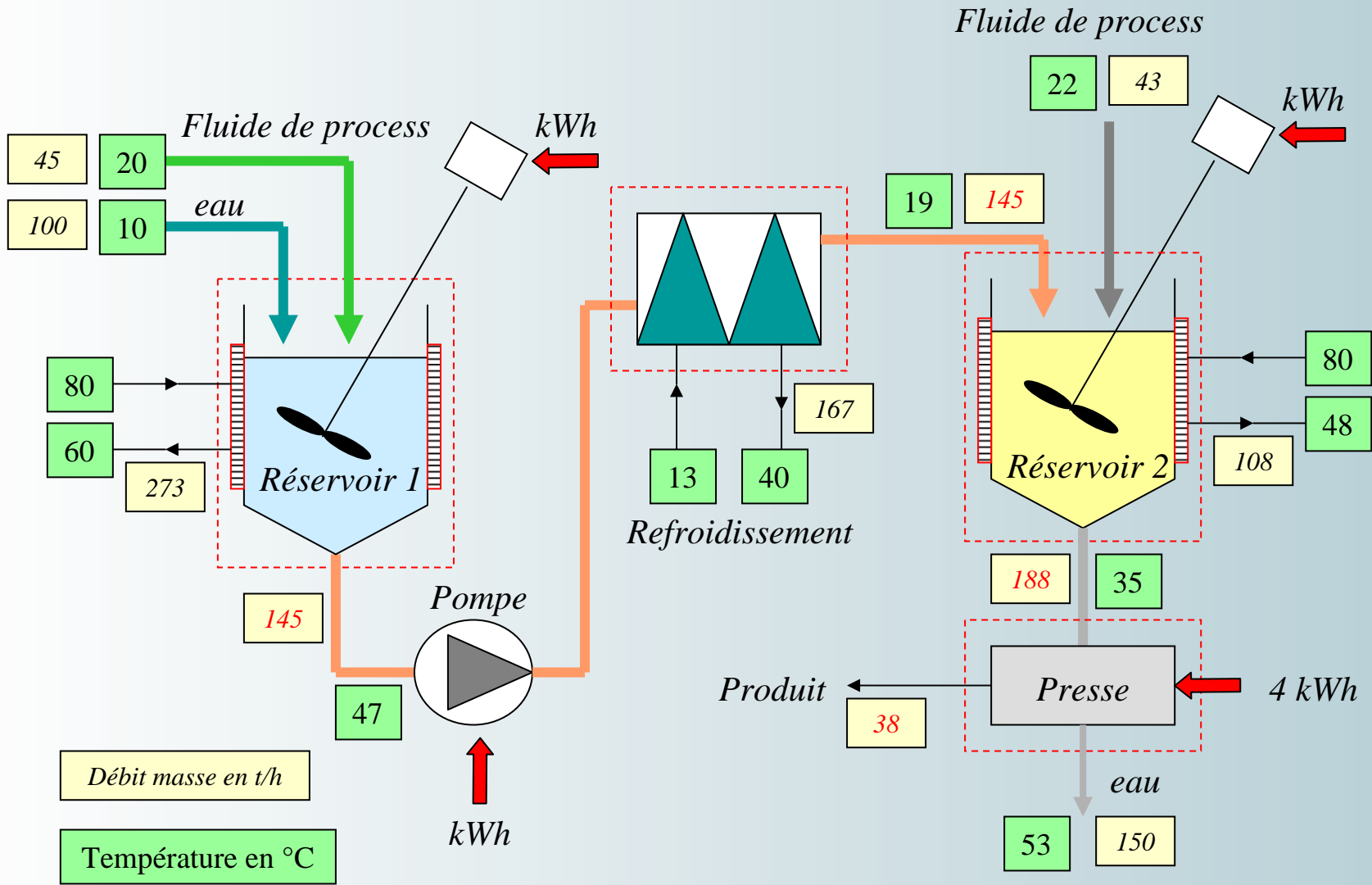
## Cas d'étude : STATION DE POMPAGE

### 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...**



# Cas d'étude : PAPETERIE





**UCL**

Université  
catholique  
de Louvain

## PAPETERIE : Bilan global

### INPUT d'énergie

#### • Réservoir 1 :

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

#### • Réservoir 2 :

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

#### • Presse :

**TOTAL :** 4.000 kW  
**17.643 kW**

### OUTPUT d'énergie

• Refroidisseur : (40-13) x 167 x 1.16	5.230 kW
• Eau de décharge : 53 x 150 x 1.16	9.222 kW
• Produit fini : 53 x 38 x 1.16	2.336 kW
<b>TOTAL :</b>	<b>16.788 kW</b>

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





## Inventaire des inputs et outputs

### Inputs d'énergie au processus

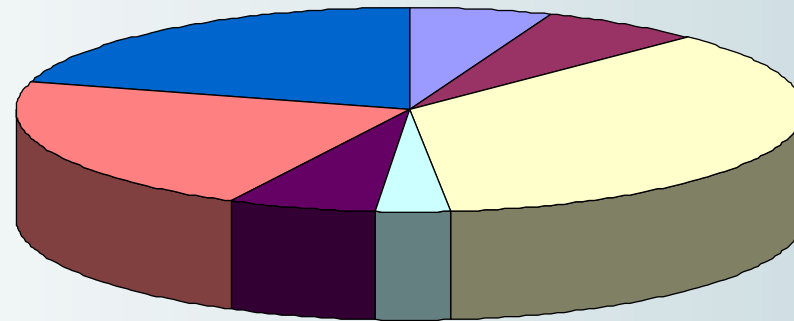
• <b>Fluide de process au réservoir 1 :</b>	1.044 kW	5.7 %
• <b>Eau au réservoir 1 :</b>	1.160 kW	6.4 %
• <b>Chauffage réservoir 1 :</b>	6.333 kW	34.9 %
• <b>Apport de l'ambiance au refroidisseur :</b>	0.521 kW	2.9 %
• <b>Fluide de process au réservoir 2 :</b>	1.097 kW	6.0 %
• <b>Chauffage réservoir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

### Outputs d'énergie du processus

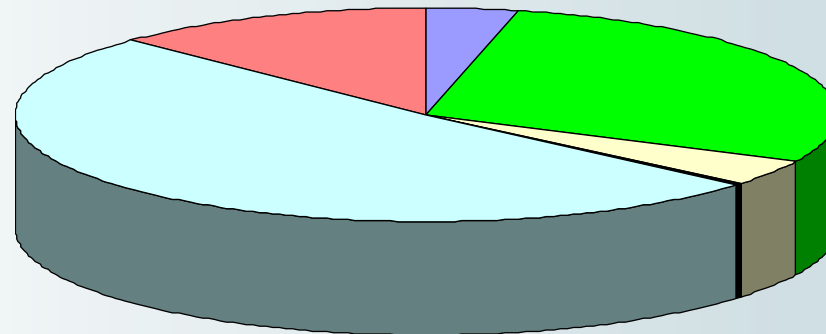
• <b>Perte à l'ambiance réservoir 1 :</b>	0.632 kW	3.5 %
• <b>Eau de refroidisseur :</b>	5.230 kW	28.8 %
• <b>Perte à l'ambiance réservoir 2 :</b>	0.669 kW	3.7 %
• <b>Perte à l'ambiance de la presse :</b>	0.075 kW	0.4 %
• <b>Eau provenant de la presse :</b>	9.222 kW	50.7 %
• <b>Produit fini :</b>	2.336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

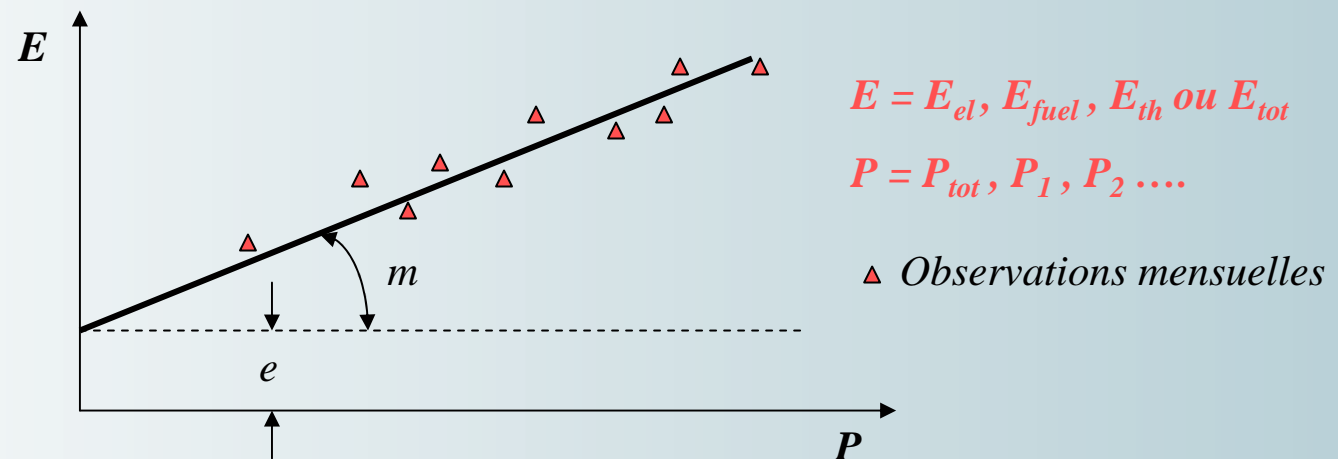
Temps d'observation  $\Rightarrow$  type d'industrie  $\Rightarrow$  période mensuelle

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





## 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 ...



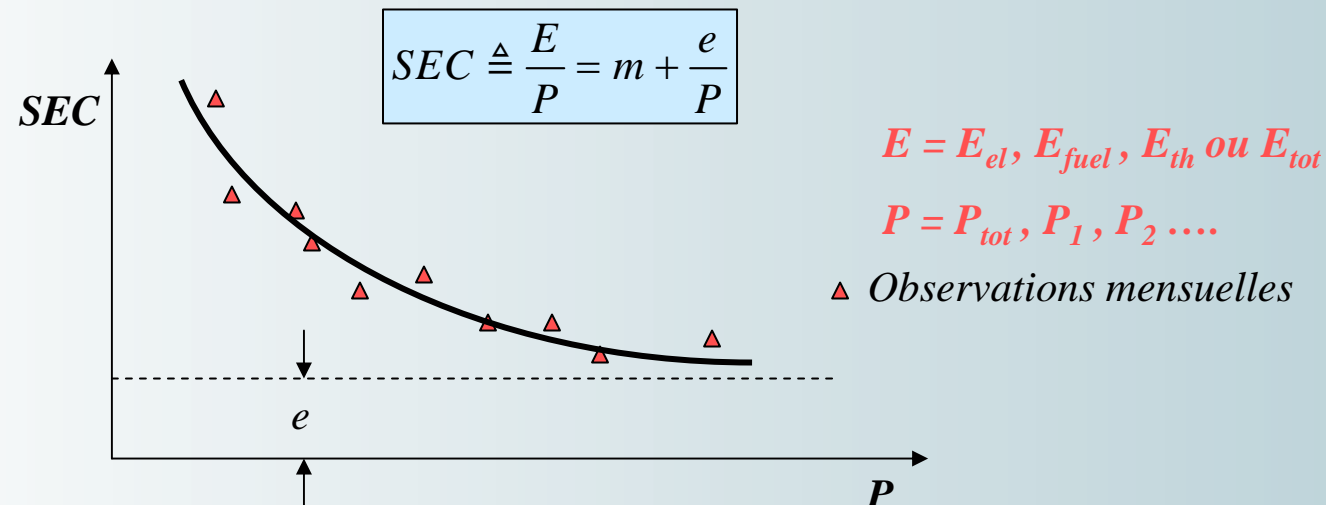
## Analyse de la relation entre production et consommation

- **$e$  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*



**Exemple : Production d'électricité ou de chaleur, métallurgie, pétrochimie ...**



## 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>

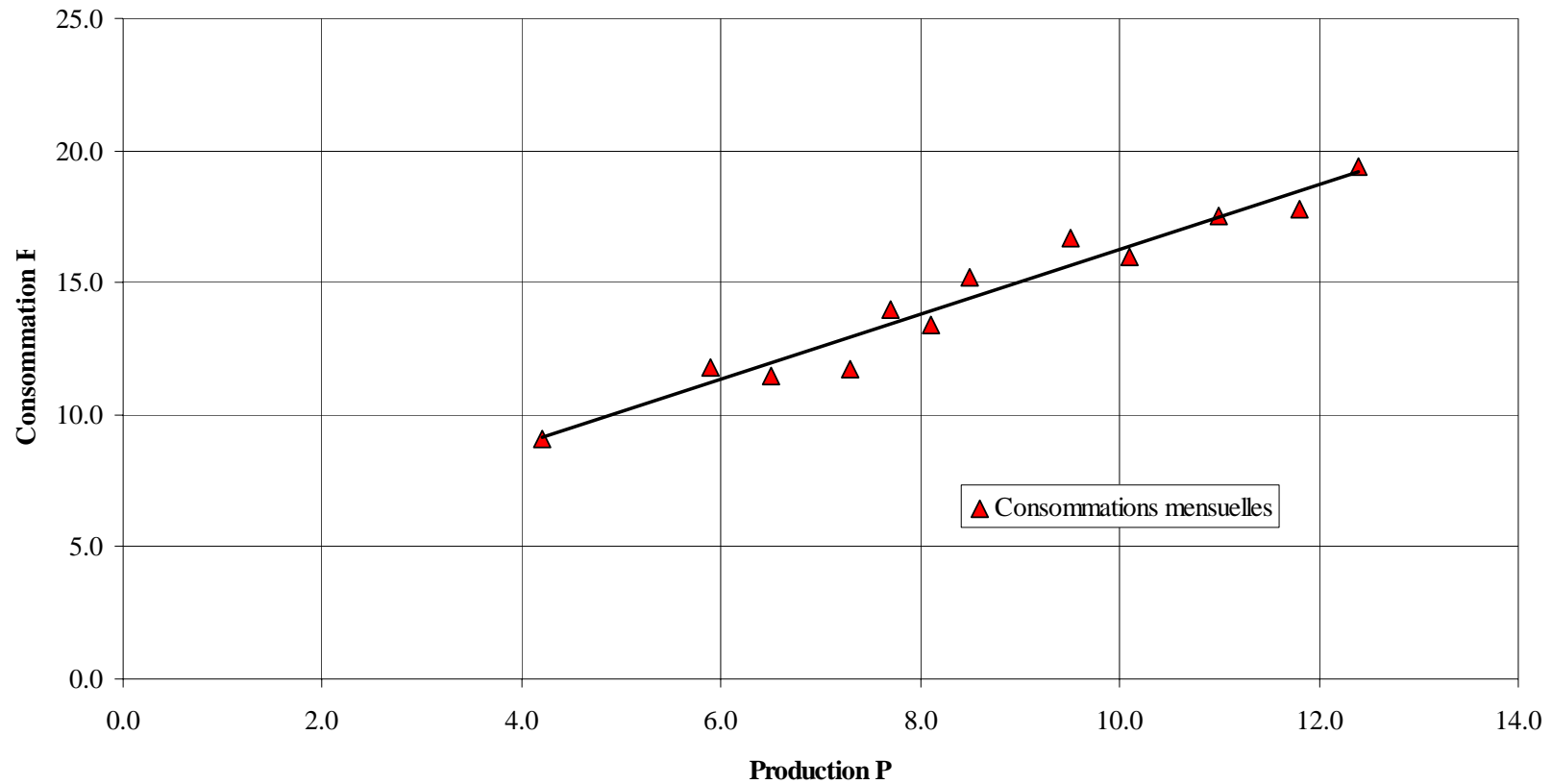
### Questions

- *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

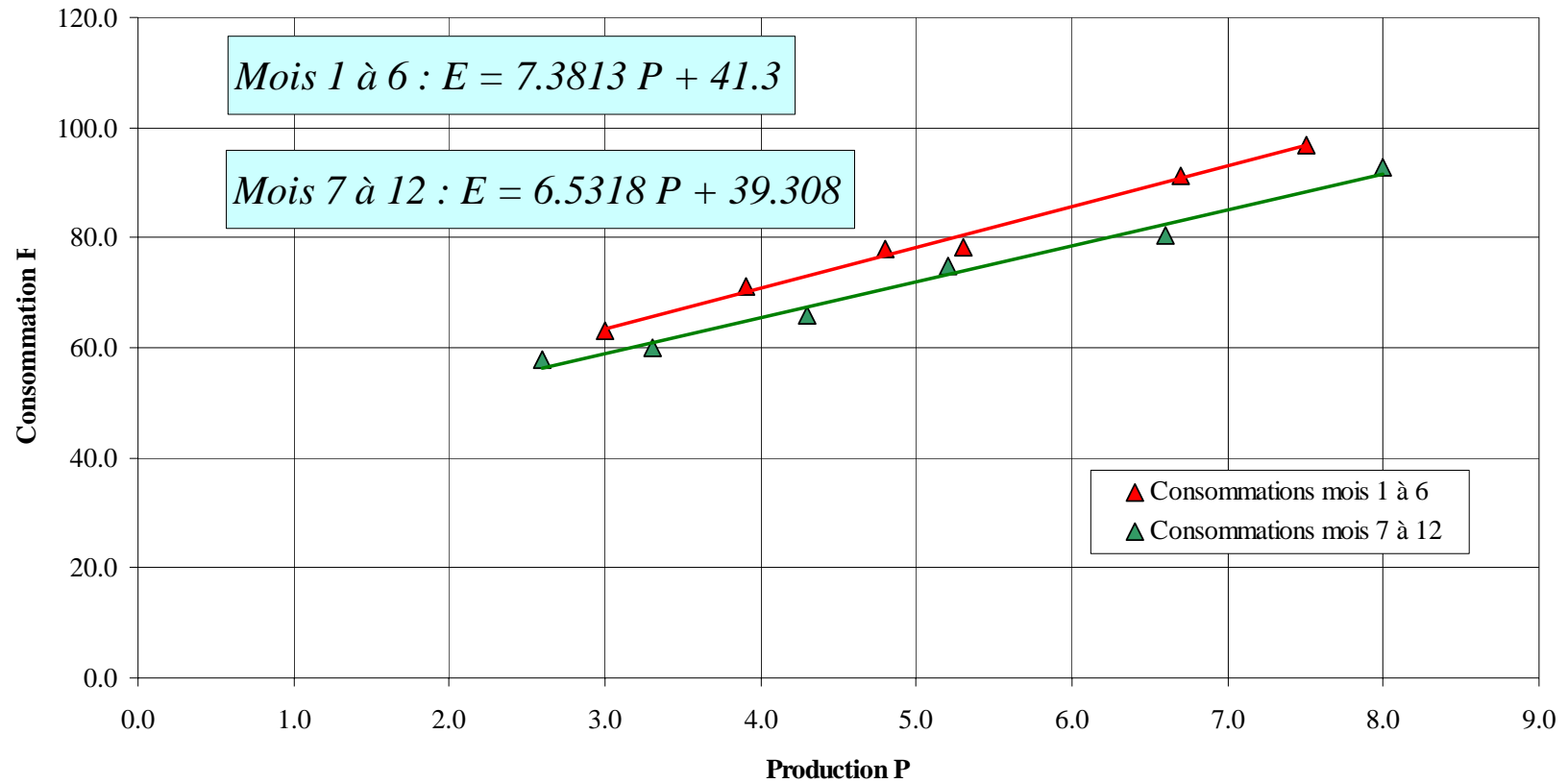
<i>Mois</i>	<i>P</i>	<i>E</i>	<i>SEC</i>	<i>E estimé</i>	<i>Ecart</i>
1	7.5	96.8	12.91	96.66	-0.14
2	4.8	77.8	16.21	76.73	-1.07
3	5.3	78.4	14.79	80.42	2.02
4	3.0	63.0	21.00	63.44	0.44
5	6.7	91.1	13.60	90.75	-0.35
6	3.9	71.0	18.21	70.09	-0.91
<i>Moyenne</i>	<i>5.2</i>	<i>79.7</i>	<i>16.1</i>		<i>1.13</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



$$\Delta E = 0.85 + 1.99 P$$



# Gestion de l'énergie dans l'industrie

## Définition

Administration de l'approvisionnement et de l'utilisation de l'énergie

### *Objectif :*

**Réduire les coûts de l'énergie tout en préservant l'environnement**

### *Moyens :*

- ⇒ *Bonne gestion courante de l'énergie (Energy conservation)*
- ⇒ *Systèmes de récupération d'énergie (Energy recovery)*
- ⇒ *Systèmes de substitution d'énergie (Energy substitution)*
- ⇒ *Intégration des processus de production (Energy integration)*

- **La gestion de l'énergie est un effort continu**
- **La gestion de l'énergie n'est pas uniquement un travail d'ingénierie, mais également de conscientisation et de formation...**



**UCL**

Université  
catholique  
de Louvain

## Règles de base de la gestion de l'énergie dans l'industrie

1. Ne peut être amélioré que ce qui est bien connu ...**CONNAISSANCE DU PROCESS**
  2. Priorité à :
    - ⇒ *Maintenance des unités de production et d'utilisation*
    - ⇒ *Formation continue du personnel concerné*
    - ⇒ *Gestion en « bon père de famille » (house keeping)*
  3. Priorité à la fabrication des produits : l'approvisionnement en énergie est un service ...
  4. L'étude et l'implantation de nouveaux systèmes de récupération, d'intégration ou de substitution doivent être mûrement réfléchies
    - ⇒ *Implication sur la production*
    - ⇒ *Conséquences sur la qualité des produits*
    - ⇒ *Évaluation des avantages supplémentaires*
    - ⇒ *Évaluation des contraintes inhérentes aux nouveaux systèmes*
- L'enjeu d'économie d'énergie ⇒ Gestion « Énergie »**





## Différents moyens d'économie d'énergie

1. Changement du processus de production, mise en œuvre d'innovations techniques.
  2. Système de récupération d'énergie.
  3. Réduction des consommations et/ou de pertes de chaleur.
  4. « Process integration » : Pinch technology.
- **L'utilisation efficace de l'énergie doit être envisagée lors de la conception des installations.**
  - **La modification d'installation existante coûte cher.**

## 1. Changement de processus de fabrication - Exemples

- Chauffage par induction  $\Rightarrow$  chauffage direct de la charge.
- Chauffage par micro-ondes : caoutchouc, alimentation ...
- Fabrication par voie humide  $\Rightarrow$  voie sèche (cimenteries ...)
- Coulée continue + laminage direct (sidérurgie, métallurgie...)
- Substitution de matériaux (moins « énergétivores »).

## 2. Systèmes de récupération d'énergie - Exemples

- Récupération de chaleur :
  - $\Rightarrow$  *Préchauffage de l'air, de la charge...*
  - $\Rightarrow$  *Brûleurs auto-récupérateurs*
  - $\Rightarrow$  *Échangeurs de chaleurs*
  - $\Rightarrow$  *Pompes à chaleur*
  - $\Rightarrow$  *Évaporateurs à effets multiples*
- Récupération des déchets  $\Rightarrow$  recyclage, combustion, gazéification
- Intégration énergétique de plusieurs entreprises
  - $\Rightarrow$  *Utilisation de gaz fatals*
  - $\Rightarrow$  *Récupération des pertes à la cheminée : distribution de chaleur*
  - $\Rightarrow$  *Production combinée de chaleur et d'électricité : **COGENERATION***



### 3. Réduction des pertes de chaleur - Exemples

- Au niveau de la production de la chaleur :
  - ⇒ *Chaudières à hautes performances, à faible inertie.*
  - ⇒ *Réglage de l'excès d'air et de la charge : système de contrôle performant.*
  - ⇒ *Design de l'équipement de production : division entre plusieurs unités*
  - ⇒ *Adéquation entre production et consommation : régulation*
- Au niveau du transfert de chaleur vers les matières à chauffer :
  - ⇒ *Augmentation des coefficients d'échange ⇔ perte de de chaleur ?*
  - ⇒ *Ailettes + promoteurs de turbulence.*
  - ⇒ *Augmentation des températures de flammes.*
  - ⇒ *Lits fluidisés.*
  - ⇒ *Maintenance des surfaces d'échange (Fooling effect).*
  - ⇒ *Utilisation de géométrie adéquates.*
- Au niveau de la distribution de chaleur :
  - ⇒ *Optimisation de l'isolation thermique.*
  - ⇒ *Fuites et maintenance du réseau de distribution.*
  - ⇒ *Récupération des condensats.*
  - ⇒ *Design du réseau de distribution : organisation de la distribution.*
  - ⇒ *Choix des fluides caloporteurs (vapeur ou eau...).*
- Au niveau de l'automatisation de la production et de la distribution :
  - ⇒ *Système d'acquisition des données - contrôle des équipements.*