

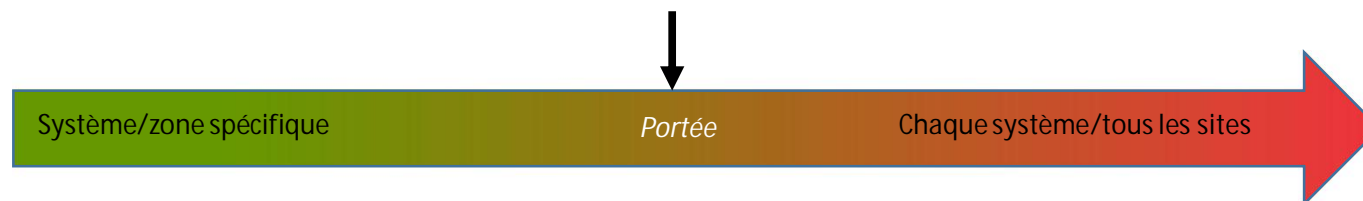
Chapitre 1 : Audit énergétique

1-Définition:

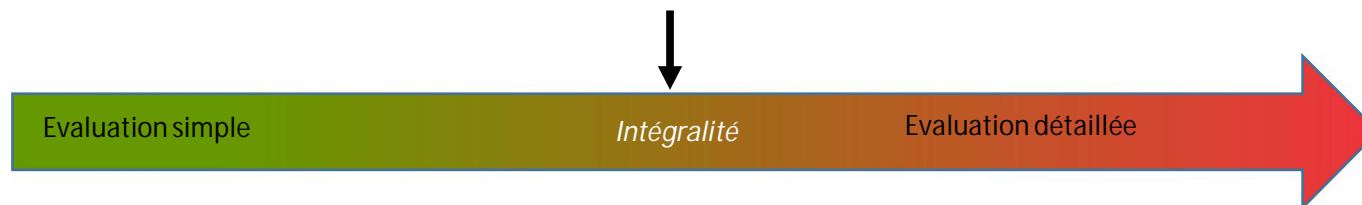
L'audit énergétique est un outil d'identification des possibilités d'optimisation des dépenses énergétiques. Il a pour finalité d'améliorer l'efficacité énergétique à partir de l'analyse de l'ensemble des flux énergétiques d'un système et permet de repérer les gisements d'économies d'énergie.

2- Critères de classification:

En général, le type de l'audit énergétique peut être classé selon les échelles suivantes:



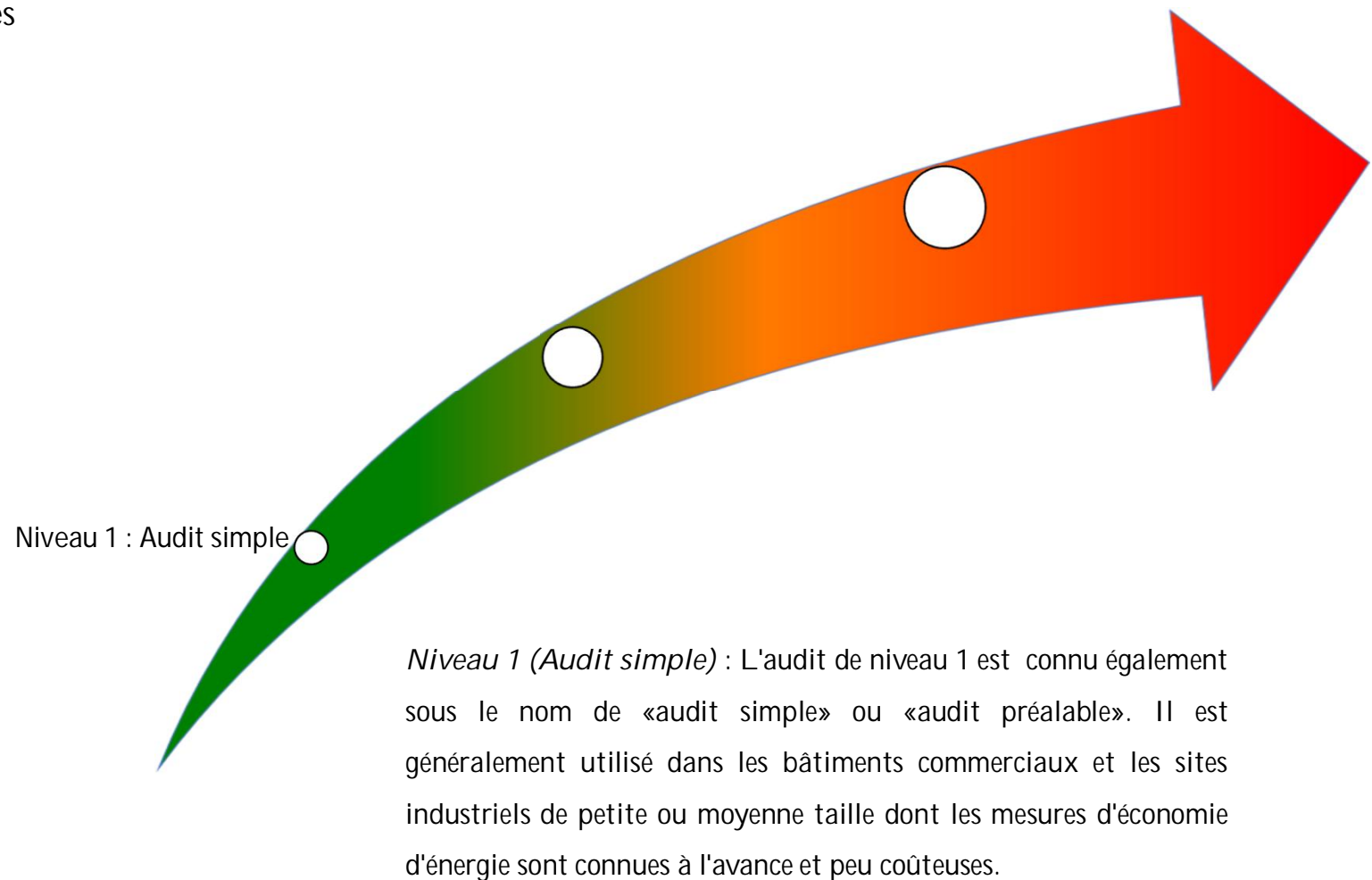
De la "plus étroite" quand l'audit énergétique couvre généralement un seul système spécifique (ou un processus) à la «plus large» quand celui-ci couvre toute une zone et des postes consommateurs d'énergie du site.



La précision, la rigueur et le niveau de complexité des méthodes et des appareils de mesures utilisés pour l'estimation et l'évaluation du potentiel économie d'énergie.

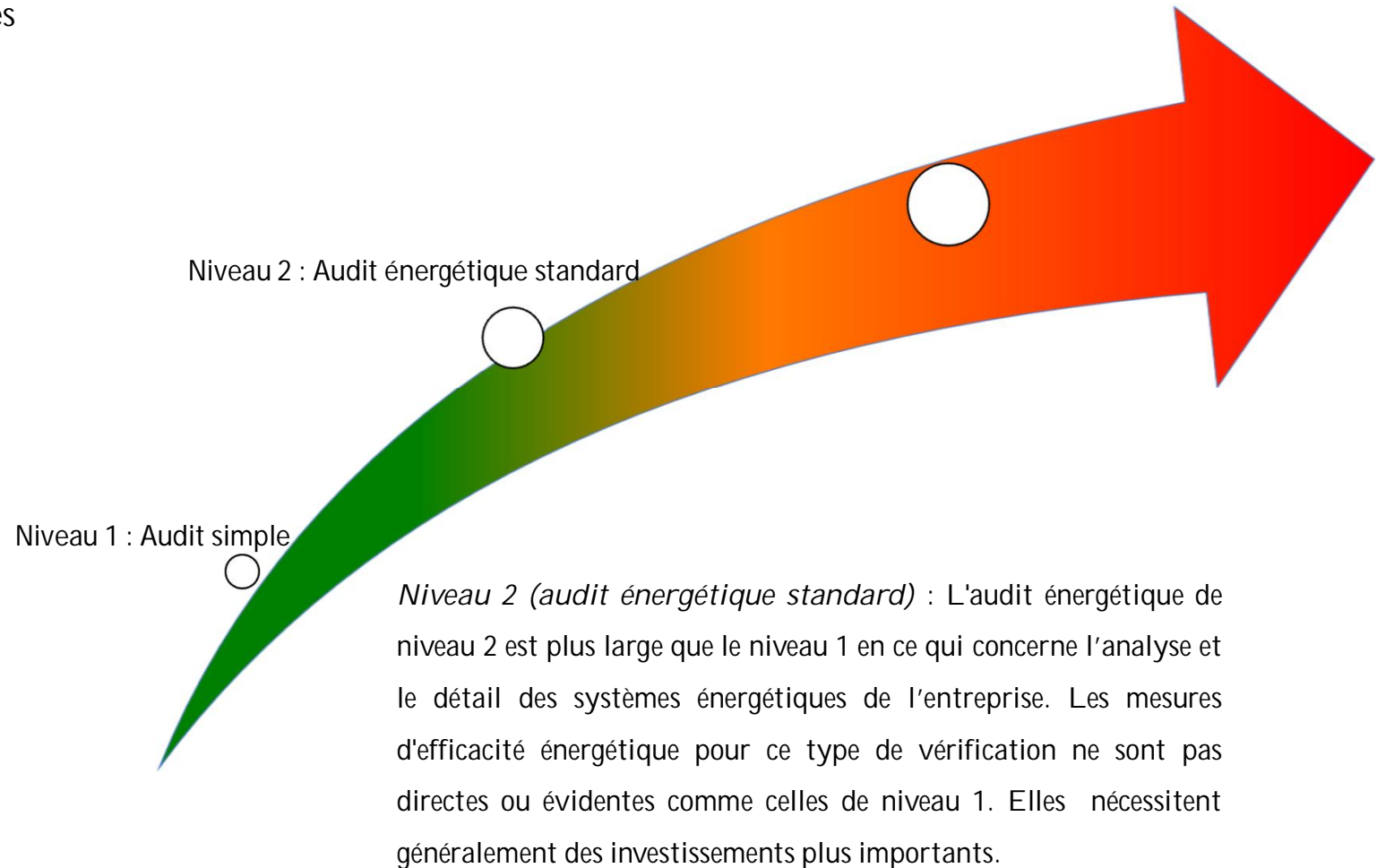
3- Classification ASHRAE

ASHRAE (Société américaine des ingénieurs en chauffage, réfrigération et climatisation) a défini trois échelons d'audits progressifs. Chaque niveau d'audit reposera sur le précédent. Les différents niveaux d'ASHRAE sont présentés ci-après



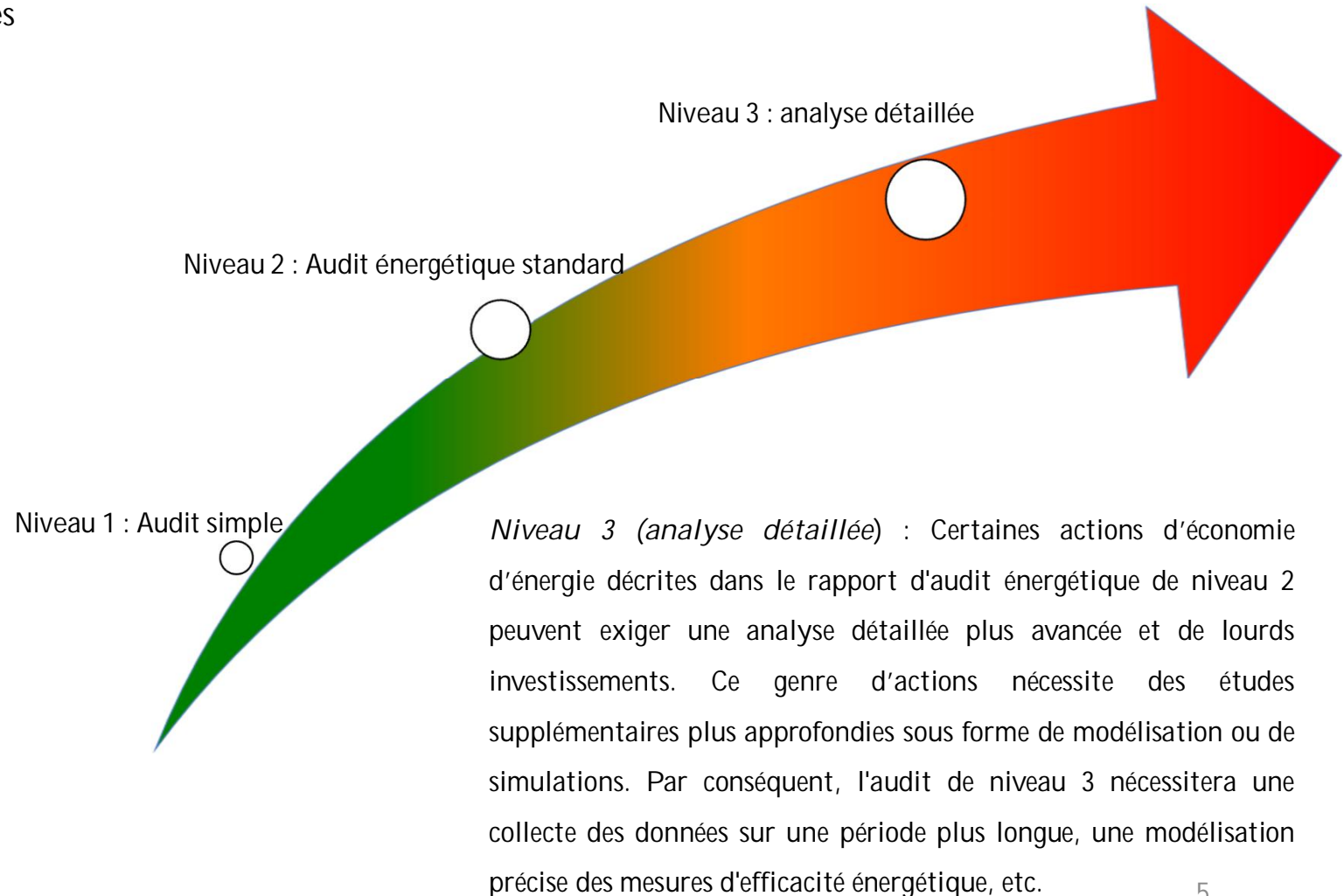
3- Classification ASHRAE

ASHRAE (Société américaine des ingénieurs en chauffage, réfrigération et climatisation) a défini trois échelons d'audits progressifs. Chaque niveau d'audit reposera sur le précédent. Les différents niveaux d'ASHRAE sont présentés ci-après



3- Classification ASHRAE

ASHRAE (Société américaine des ingénieurs en chauffage, réfrigération et climatisation) a défini trois échelons d'audits progressifs. Chaque niveau d'audit reposera sur le précédent. Les différents niveaux d'ASHRAE sont présentés ci-après



4- Règles à respecter par l'auditeur

- Chiffrer au mieux les économies d'énergie réalisables et préciser les conditions économiques de réalisation.
- Suivre une démarche rigoureuse explicitée et justifiée dans les rapports d'études.
- Être exhaustif dans ses recommandations et fournir toutes les informations objectives nécessaires au maître d'ouvrage pour décider des suites à donner .
- Ne pas privilégier a priori un type d'énergie ni certaines modalités de fourniture d'énergie ou de tout autre utilité (vapeur, froid, chaud, air comprimé, ...).
- N'adjoindre aucune démarche commerciale concernant des biens ou services (ayant un lien avec les recommandations) au cours de son intervention.
- Au cas où un pré-audit aurait déjà été réalisé, l'auditeur devra valider les préconisations du pré-audit et approfondir, grâce à la mesure, les pistes d'investigation identifiées comme prioritaires lors du pré-audit.
- Maintenir strictement confidentiels toutes les informations, documents et résultats produits en exécution de l'audit, ainsi que toutes les données et informations qui lui auront été communiquées par le maître d'ouvrage.

5- Préconisations de l'auditeur

Les préconisations sont classées en trois catégories :

- Action immédiate, permettant une économie d'énergie sans nécessiter d'investissement.
- Action prioritaire, à mener à court terme car ayant un niveau de rentabilité élevé.
- Action utile, à mettre en œuvre car de rentabilité certaine mais pouvant être différée du fait d'implications sur le fonctionnement de l'entreprise plus lourdes à gérer ou d'interactions avec des actions prioritaires.

Ces actions doivent être en cohérence avec une éventuelle démarche de management environnemental (notamment le Plan Environnement Entreprise) ou énergétique (ISO 50001).

6-Procédure général d'un audit énergétique

En général un audit énergétique complet est réalisé en trois étapes :

- ❖ Phase I : Pré-audit
- ❖ Phase II : Phase d'audit
- ❖ Phase III : Rapport d'audit et le suivi

6-Procédure général d'un audit énergétique

❖ Phase I : Pré-audit

○ Etape 1 - Visite préliminaire rapide : les objectifs de cette étape seront :

- Estimer le nombre de jours et le nombre d'auditeurs par jour à affecter pour réaliser l'audit énergétique.
- Elaborer un planning d'intervention de l'audit.
- Prévoir et de préparer les d'appareils de mesures nécessaires.
- Collecte des données :
 - Les schémas unifilaires d'installation, de procédés pour les industriels,
 - Le nombre des équipements consommateurs d'énergie, avec leurs puissances ,
 - Les factures énergétiques des trois dernières années (électricité, fioul, gaz, etc.),
 - Les données de production des trois dernières années (productions mensuelles, ratios énergétique, etc.).



6-Procédure général d'un audit énergétique

❖ Phase I : Pré-audit

○ Etape 2 - Analyses des données préliminaires :

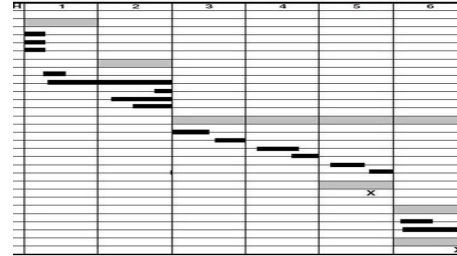
- Identifier un profil énergétique historique.
- Déterminer le type de combustible ayant une influence prépondérante sur la consommation d'énergie,
- Identifier les pics de consommation par type de combustible,
- Evaluer si l'établissement est pénalisé pour un mauvais facteur de puissance ou par un mauvais choix de puissance souscrite,
- Déterminer si un combustible moins cher peut être substitué.
- Analyser l'influence de la production ou de climat sur la consommation énergétique (ceci requiert des données météorologiques et de production pour les années considérées).
- D'établir des ratios de consommation d'énergie et de les comparer aux ratios typiques d'industries similaires,



6-Procédure général d'un audit énergétique

❖ Phase I : Pré-audit

○ Étape 3 : Planning d'intervention



La visite réalisée par le responsable du bureau d'études lui permettra de préparer un planning d'intervention pour la suite de la mission, à savoir :

- Planifier et organiser l'équipe choisie pour commencer l'audit énergétique.
- Appareils de mesures (types, quantités, étalonnage,...)
- Prévoir des équipements de sécurité pour les auditeurs en cas d'une industrie dangereuse comme les fonderies, industrie chimique (casque de protection, lunettes, etc.).



6-Procédure général d'un audit énergétique

- ❖ Phase I : Pré-audit
- ❖ Phase II - phase d'audit

- Etape 1 : Réunion de démarrage



Avant de procéder à la phase d'audit, l'équipe des auditeurs doit organiser une réunion de démarrage, avec le directeur général et les chefs de services de l'établissement. L'objectif de cette rencontre est d'expliquer le but de la mission et de designer un comité interne de suivi afin :

- D'établir une communication avec les auditeurs experts,
- De faciliter l'accès aux services, machines pour effectuer des mesures, etc.

6-Procédure général d'un audit énergétique

- ❖ Phase I : Pré-audit
- ❖ Phase II - phase d'audit
 - Étape 1 : Réunion de démarrage
 - Étape 2 : Diagnostics et mesures par appareils sophistiqués

Cette étape consiste à examiner les différents points de fonctionnement de l'installation industrielle. Par l'utilisation d'un ensemble des appareils de mesures performantes (camera thermique, analyseurs de réseau, détecteur des fuites d'air comprimé, etc.), les auditeurs détermineront les sources des pertes énergétiques et proposeront un plan d'actions adéquates.

○ Étape 2 : Diagnostics et mesures par appareils sophistiqués

A. Mesure de l'éclairage : luxmètre

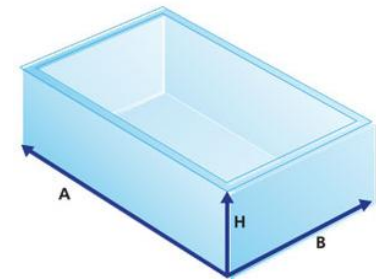
Le luxmètre est un dispositif qui mesure les niveaux d'éclairement d'une pièce (bureau, couloir, atelier,...)



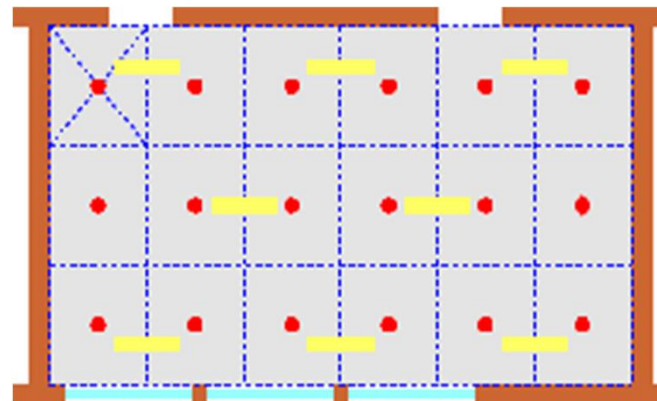
➤ Méthode de mesure de éclairement moyenne

indice du local (K)	nombre de mesures (n)
moins de 1	4
1.. 1,9	9
2.. 2,9	16
3 et plus	25

$$K = \frac{B \cdot A}{H \cdot (B + A)}$$



$$E_{\text{moy}} = \frac{E_1 + E_1 + E_1 + \dots E_n}{n}$$



○ Étape 2 : Diagnostics et mesures par appareils sophistiqués

A. Mesure de l'éclairage : luxmètre

- Le luxmètre est un dispositif qui mesure les niveaux d'éclairement d'une pièce (bureau, couloir, atelier,...)
- Les valeurs moyennes mesurées seront vérifiées à celles recommandées par les normes d'éclairage.



Type d'intérieur, tâche ou activité	Éclairement moyen recommandé (lux)	Hauteur du plan utile
Classement, transcription	300	0.75 m
Écriture, dactylographie, lecture, traitement de données	500	0.75 m
Dessin industriel	750	0.85 m
Poste de conception assistée par ordinateur	500	0.75 m
Salles de conférence et de réunion	500	0.75 m

- Étape 2 : Diagnostics et mesures par appareils sophistiqués

- B. Mesures de températures :*

- B.1. Thermomètre*

Les thermocouples utilisés doivent être soigneusement sélectionnés en fonction de l'application et correctement positionné.



- Pour mesurer la température de l'ambiance,
- Pour enregistrer la température,
- Mesurer la température d'une paroi, d'un ballon d'eau chaude mal isolé
- Pour mesurer la température des fumées d'une chaudière

○ Étape 2 : Diagnostics et mesures par appareils sophistiqués

B. Mesures de températures :

B.2. Camera infrarouge

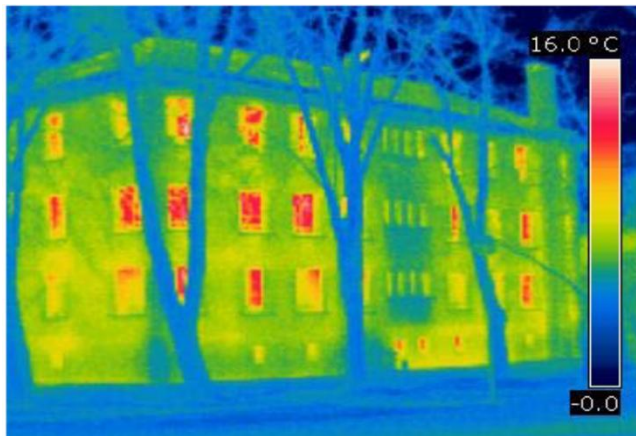
La Camera infrarouge permet de visualiser les températures sur une surface de matériaux .

➤ Principe de fonctionnement

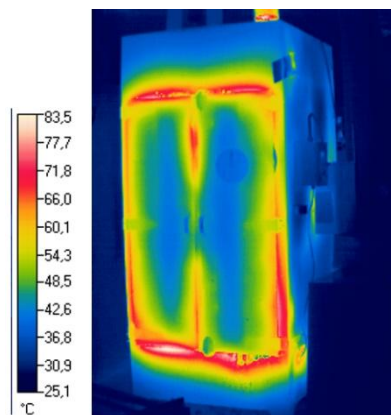
- Tout corps dont la température est supérieure au zéro absolue (0 Kelvin) émet un rayonnement électromagnétique.
- Plus la température augmente, plus l'agitation augmente et le rayonnement émis devient visible lorsque sa longueur d'onde correspond à celle de la couleur Rouge (1 μ m).
- Pour des niveaux de température courants sur terre (de -50°C à 2000°C environ) les ondes émises naturellement par les matériaux le sont dans un domaine qui s'appelle l'INFRAROUGE THERMIQUE.

B.2. Camera infrarouge

➤ Applications



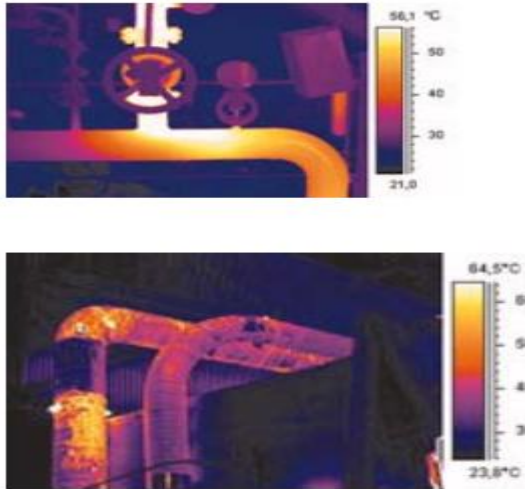
Enveloppe du bâtiment



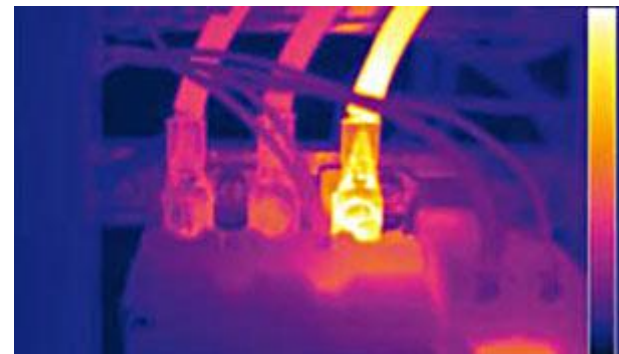
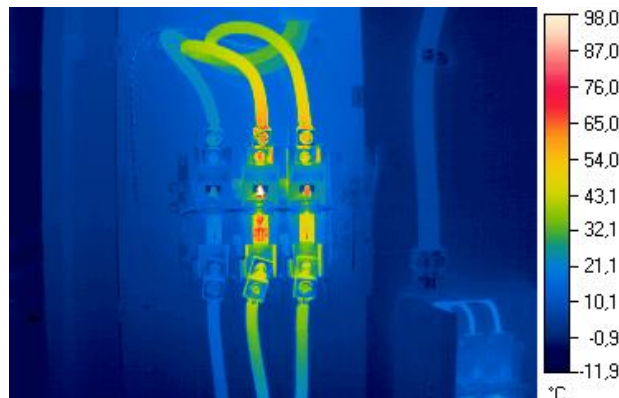
Fours, chambres froides,...

B.2. Camera infrarouge

➤ Applications



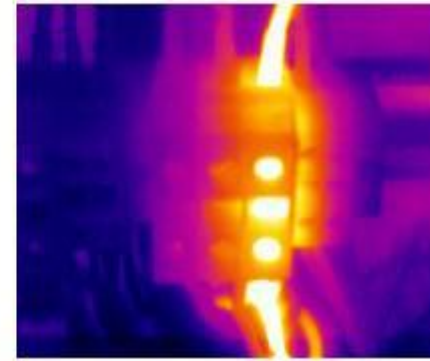
Systèmes de distribution d'eau chaude, vapeur, ou de climatisation



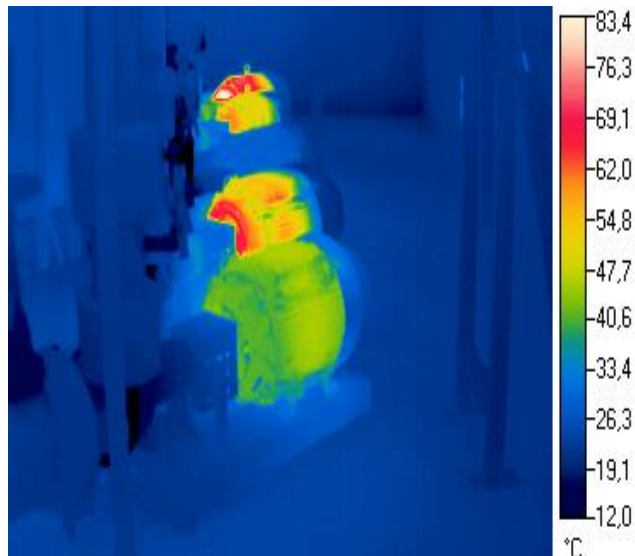
Systèmes électriques : Déséquilibre de courant, surcharge

B.2. Camera infrarouge

➤ Applications



Systèmes électriques : mauvais serrage



Systèmes électriques : surcharge des moteurs, défaillance , ...

○ Étape 2 : Diagnostics et mesures par appareils sophistiqués

C. Mesures électriques :

C.1. Pince multimètre

La pince multimètre dernière génération peut effectuer plusieurs mesures à la fois : V, A, les trois puissances active, réactive et apparente et le facteur de puissance de système.

- Mesurer les puissances instantanées et de faire un bilan de puissance des départs,
- Mesurer la puissance à vide et en charge d'un compresseur d'air comprimé ou d'un moteur,
- Mesure la puissance fournie d'une batterie de condensateur fixe et de la comparée la valeur obtenue à sa valeur nominale, pour s'assurer de son fonctionnement ...etc.



Chapitre 1 : Audit énergétique

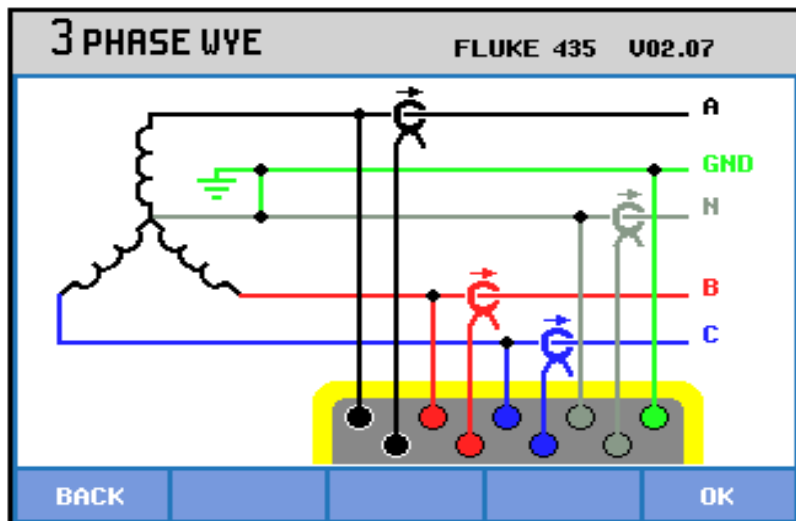
○ Étape 2 : Diagnostics et mesures par appareils sophistiqués

C. Mesures électriques :

C.2. Analyseur de réseau

Le rôle d'un analyseur de réseau triphasé est triple. Il permet de :

- Mesurer de V, A, puissances et perturbations des réseaux de distribution d'électricité,
- Obtenir une image instantanée des principales caractéristiques d'un réseau triphasé.
- Enregistrement des différents paramètres électriques dans le temps (analyse de la qualité d'énergie électrique)



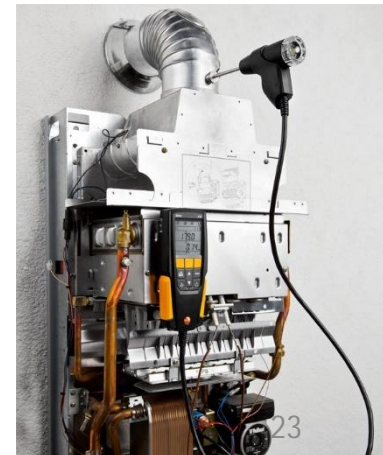
○ Étape 2 : Diagnostics et mesures par appareils sophistiqués

D. Analyseur de combustion :

Les analyseurs de combustion sont des instruments électroniques portables utilisés pour mesurer l'efficacité de la combustion des chaudières, fours ...etc.

L'analyseur possède un écran et une imprimante qui donne les résultats suivants :

- CO₂:% en volume
- O₂:% en volume
- CO: parts par million, ppm. (Par exemple 2.000 ppm = 0,2%)
- Excès d'air : %
- Rendement de la combustion: %



○ Étape 2 : Diagnostics et mesures par appareils sophistiqués

F. Détecteurs de fuites à ultrasons :

Un détecteur de fuites à ultrasons est un instrument qui permet de détecter les fuites d'air par ultrasons.

Détecter les fuites dans les systèmes de :

- Réfrigération et de climatisation/ chauffage,
- Purgeurs de vapeur,
- Les systèmes d'air comprimé.



Cet appareil est utile pour vérifier les fuites d'air autour des portes et fenêtres et joints, fuites d'eau dans les toits et fuites dans les cuves à vide.

6-Procédure générale d'un audit énergétique

- ❖ Phase I : Pré-audit
- ❖ Phase II - phase d'audit
- ❖ Phase III –Rapport d'audit et le suivi
 - Etape 1 : Rapport d'audit énergétique

Dans cette étape les auditeurs devront établir un rapport d'audit énergétique approfondi regroupant :

- Toutes les informations collectées, les investigations effectuées ainsi que les recommandations et le plan des opérations proposé.
- Les actions d'efficacité énergétique préconisées doivent être regroupées en trois types : action sans investissement, à TRI entre un 1 an et 3 ans et celles avec TRI dépassant 3 ans.

Projets	Economies d'énergie (MWh)	émissions de CO ₂ évitées (t)	Investissement (kDh)	Temps de retour (ans)
.....
.....

6-Procédure générale d'un audit énergétique

- Etape 1 : Rapport d'audit énergétique

- Type de mesures d'économie - Temps de mise en œuvre

- Immédiat (Psychologique, changement de tarification,...)
 - ⇒ 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
 - ⇒ Achat et remplacement des équipements par d'autre de haute rendement.
 - ⇒ Contrôle automatique et optimisé des unités de production et d'utilisation.
 - ⇒ Récupération de chaleur.
 - ⇒ changement du principe de fabrication.

6-Procédure générale d'un audit énergétique

- Etape 1 : Rapport d'audit énergétique

- 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 Revues des améliorations passées
- 1.5 Recommandations d'amélioration

- 4. Amélioration dans l'utilisation de l'électricité

- 4.1 Description du système
- 4.2 Résultats des campagnes de mesure
- 4.3 analyse des consommations
- 4.4. Historique des consommations en électricité
- 4.5. Puissance appelée
- 4.6. Facteur de puissance
- 4.7. Répartition des consommations

- 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

6-Procédure générale d'un audit énergétique

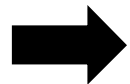
- ❖ Phase I : Pré-audit
- ❖ Phase II - phase d'audit
- ❖ Phase III –Rapport d'audit et le suivi
 - Étape 1 : Rapport d'audit énergétique
 - Étape 2 : Présentation du rapport d'audit



L'objectif de cette réunion est d'établir une discussion entre les auditeurs et les responsables de l'établissement au sujet de la réalisation du plan d'actions proposé.

6-Procédure générale d'un audit énergétique

- ❖ Phase I : Pré-audit
- ❖ Phase II - phase d'audit
- ❖ Phase III –Rapport d'audit et le suivi
 - Étape 1 : Rapport d'audit énergétique
 - Étape 2 : Présentation du rapport d'audit
 - Étape 3 : Réalisation du plan d'actions et accompagnement



Après avoir accompli toutes les étapes précédentes, les responsables de l'établissement doivent commencer la mise en œuvre des projets d'efficacité énergétique qu'ils jugent rentables et de valider l'économie d'énergie estimée dans le rapport de l'audit pour chaque action retenue.

7. Programmes d'audits énergétiques

Les programmes d'audits énergétiques sont des sous-programmes au sein des programmes de l'efficacité énergétique et de l'environnement. Le classement des programmes des audits énergétique lancés au monde au secteur de l'industrie peut se faire selon les points suivants

- ✓ L'approche d'application (obligation ou volontaire),
- ✓ Secteur énergétique (industrie, bâtiment, transport,...)
- ✓ Les subventions et les financements ,
- ✓ Norme de réalisation de l'audit obligatoire,
- ✓ Certification ou agrément obligatoire des auditeurs ,
- ✓ Seuil de consommation énergétique à laquelle l'audit devient obligatoire
- ✓ Période de renouvellement des audits
- ✓ Sanctions pour non-conformité de l'audit énergétique
- ✓ Rapports d'audit conforme ,

7. Programmes d'audits énergétiques



	Tunisie	Australie	La chine	l'Union européenne
Secteurs concernés	-Industrie, -Sociétés de transport, -Tertiaire et résidentiel	-Industrie, -Tertiaire -Sociétés de transport,	-Procédés industriels -Bâtiments	-Bâtiments -Procédés industriels -Sociétés de transport
Seuil d'obligation de l'audit	-Industrie: 1000 tep/an, -Tertiaire ,résidentiel et transports: 500 tep/an	12 000 tep/ an.	10 000 tep / an.	-Plus de 250 salariés, ou -Chiffre d'affaires annuel supérieur à 50 millions d'euro ou -Bilan annuel excédant 43 millions d'euros.
Agrément obligatoire de l'auditeur	oui	oui	oui	oui
Période de renouvellement	5 ans	5ans	5ans	4 ans

7. Programmes d'audits énergétiques

❑ Cas du Maroc : Loi marocain 47-09 d'Efficacité Energétique



► Article 12:

Les **établissements**, les **entreprises** et les **personnes physiques** dont la consommation d'énergie thermique et/ou électrique **dépasse un seuil spécifique à chaque secteur** fixé par voie réglementaire sont soumises à un **audit énergétique obligatoire et périodique**.

L'audit énergétique obligatoire s'applique également aux établissements et entreprises de production, de transport et de distribution d'énergie.

➡ les organismes d'audit **agréés** par l'état sont les seuls chargés de réaliser l'audit énergétique obligatoire .(**Article 14**)

➡ **Soumission obligatoire à l'état , des rapports et résultats des audits réalisés (**Article 13**)**

7. Programmes d'audits énergétiques

❑ Cas du Maroc : Loi marocain 47-09 d'Efficacité Energétique



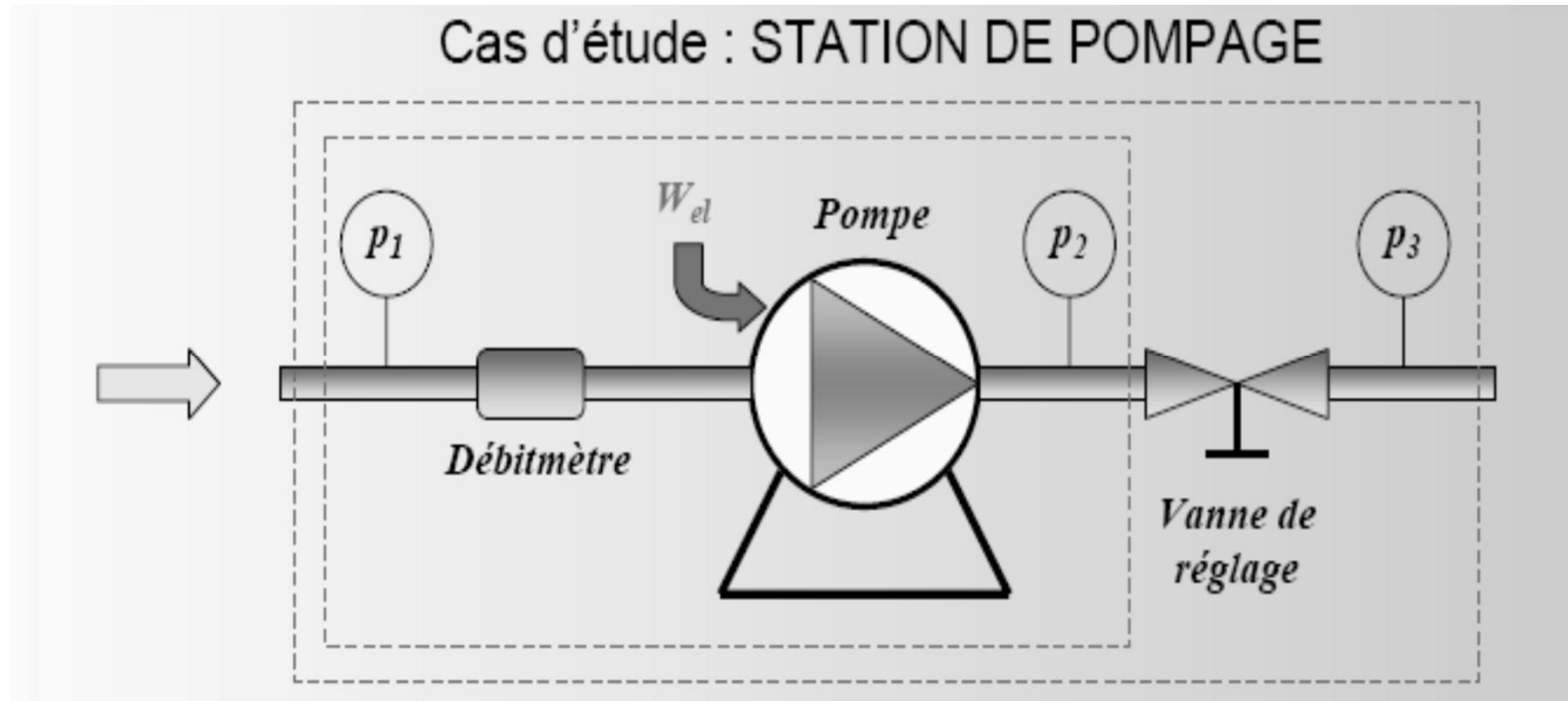
➤ Article 23 à 27 : Pénalités :

- ▶ Non réalisation de l'audit:
30 000 à 300 000 Dhs
- ▶ Non respect des performances énergétiques
20 000 à 200 000 Dhs



Les amendes peuvent être doublées en cas de récidive

3. Etude de cas: Station de pompage



Résultats de mesures

Mécanique

- $Q_m = 100 \text{ kg/s}$ (360 m³/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 :

Transformation d'énergie :

Puissance mécanique :

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

Puissance utile :

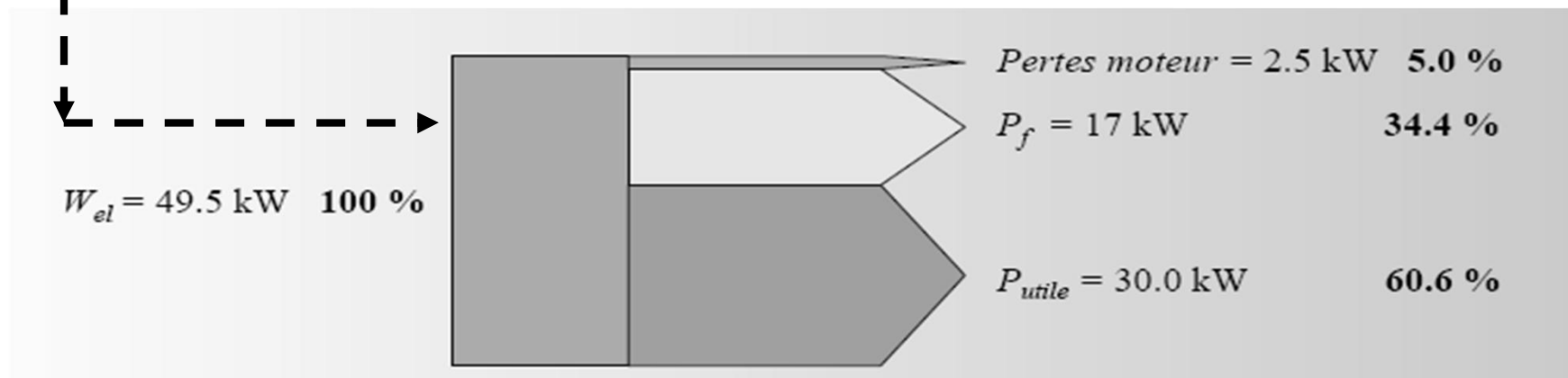
$$P_{\text{utile}} = Q_m \cdot \frac{\Delta P}{\rho} = 100 \times 3 \cdot 10^5 / 1000 = 30 \text{ kW}$$

Perte d'énergie mécanique (fluide)

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

Augmentation de température

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



Cas d'étude : STATION DE POMPAGE

Input d'énergie :

— Puissance mécanique :

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

Puissance utile :

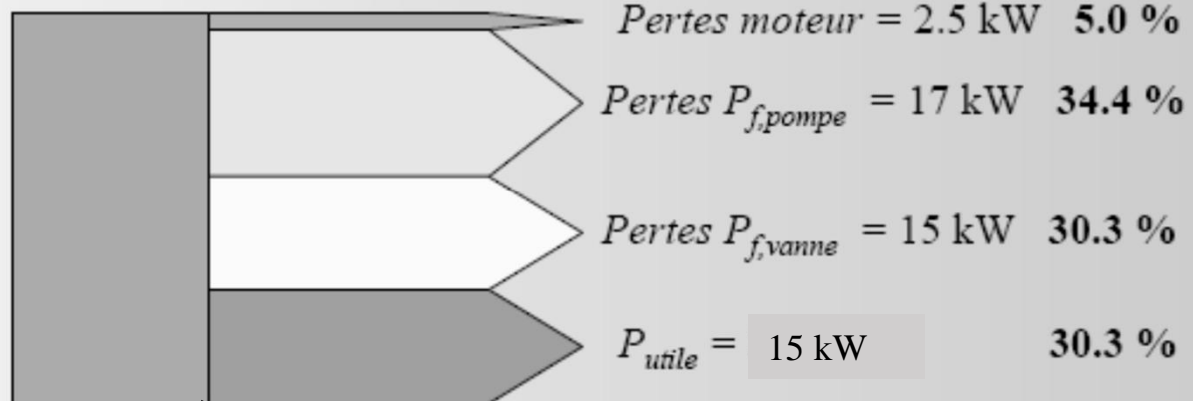
$$P_{\text{utile}} = Q_m \frac{\Delta P}{\rho} = 100 \times 1.5 \cdot 10^5 / 1000 = 15 \text{ kW}$$

Perte d'énergie mécanique
vanne:

$$P_{\text{vanne}} = Q_m \cdot \frac{\Delta P}{\rho} = 15 \text{ kW}$$

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

$W_{\text{el}} = 49.5 \text{ kW} \quad 100 \%$



Conclusions

- Design et connaissance du circuit hydraulique
- Les vannes de réglage sont « énergétivores » .
- 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...