

MODULE M1.4

$$E = mc^2$$

**Règles de base de l'énergie et
concepts théoriques
d'EINSTEIN**

Table des matières

- 1. Contexte général**
- 2. Concepts théoriques d'Einstein**
 - ✓ Flux d'énergie
 - ✓ Niveaux de température
 - ✓ Modèle de processus
 - ✓ Profil de charge



Consommation d'énergie

La consommation d'énergie peut être exprimée en :

1) **Énergie finale** = quantité d'énergie stockée dans différentes sources d'énergie entrant dans l'entreprise

- Convention EINSTEIN : contenu énergétique des combustibles en termes de PCI (pouvoir calorifique inférieur)

2) **Énergie primaire** = quantité totale d'énergie nécessaire pour générer l'approvisionnement requis en énergie

- En prenant en compte les pertes au cours des différentes étapes du traitement des combustibles.

Types d'utilisation de l'énergie

1) Utilisations **thermiques** :

Chauffage et climatisation

- ✓ Chauffage et climatisation de locaux de bâtiments (halls de production, bureaux, ...)
- ✓ Eau chaude sanitaire

2) Utilisations **non thermiques** :

Consommation énergétique électrique (et autres) pour l'éclairage, les machines et autres équipements électriques

- sauf air conditionné, refroidissement et chauffages (-> utilisations thermiques)

Utilisations finales non prises en compte dans EINSTEIN :

- ✓ Utilisation non énergétique des combustibles
- ✓ Consommation d'énergie pour le transport
- ✓ Énergie stockée dans les matières premières (mais flux de déchets potentiels)

Types d'utilisation de l'énergie

Contribution des utilisations énergétiques thermiques à la demande finale totale en énergie en Europe :

- ✓ Énergie thermique dans l'industrie : 28 %
- ✓ Chauffage et climatisation de locaux dans des bâtiments : 27 %

Consommation d'énergie pour des *utilisations thermiques dans l'industrie* européenne :

- ✓ près de 70 % de la consommation totale en termes d'énergie finale
- ✓ plus de 50 % en termes d'énergie primaire.

Énergies renouvelables

Sources d'énergies renouvelables pour la fourniture de chaud et froid :

- ✓ Énergie solaire thermique (y compris la production combinée solaire thermique)
- ✓ Biomasse et biogaz
- ✓ Énergie géothermique, ...

Impacts environnementaux

Principaux indicateurs pour l'évaluation environnementale dans EINSTEIN :

- ✓ Consommation d'**énergie primaire** (= principal indicateur utilisé)
- ✓ Génération de **CO₂**
- ✓ Génération de **déchets nucléaires** (*associés à la consommation en électricité*) **hautement radioactifs** (HR)
- ✓ *Consommation d'***eau.**

Stratégies en matière d'offre et de demande

Pour économiser l'énergie :

- ✓ Rechercher d'abord les possibilités de **réduction de la demande en énergie**
- ✓ Ensuite seulement, couvrez la demande **restante en froid et en chaud** avec un système de fourniture de chaud et de froid optimisé en termes énergétique et environnemental.

EXEMPLE

- ✓ Processus : Chauffage de l'eau jusqu'à 90 °C
- ✓ Processus de lavage alternatifs :
 - Nettoyer à basse température avec des détergents ou de la pression
 - Éviter les nettoyages en identifiant un processus qui génère de la poussière dans un espace séparé
 - etc.

Flux d'énergie

Définitions 1

✓ **Consommation d'énergie finale (FEC)**

Énergie qui entre dans l'entreprise en tant que combustibles (exprimée en PCI), électricité et systèmes de chauffage et de climatisation urbains

✓ **Consommation d'énergie finale pour les utilisations thermiques (FET)**

Énergie finale consommée pour les utilisations thermiques (chauffage ou climatisation), y compris l'électricité utilisée pour l'air conditionné et la climatisation et dans le chauffage électrique

✓ **Énergie finale pour les autres utilisations (non thermiques) (FEO)**

Énergie finale consommée pour les utilisations non thermiques

$$E_{FEC} = E_{FET} + E_{FEO}$$

Flux d'énergie

Définitions 2

✓ Consommation d'énergie finale (*FEC, FET*)

$$E_{FEC} = E_{FEC,el} + \sum_{i=1}^{N_{fuels}} E_{FEC, fuel(i)} + E_{FEC, heat}$$

$$E_{FEC} = E_{FET} + E_{FEO}$$

$$E_{FET} = \sum_{j=1}^{N_{eq}} E_{FET, j}$$

Légende :

$i = 1, \dots, N_{combustibles}$

$N_{combustible}$ = nombre de combustibles utilisés dans la société

$j = 1, \dots, N_{eq}$

N_{eq} = nombre d'unités d'équipement thermique

Flux d'énergie

Définitions 3

✓ **Consommation d'énergie finale (FEC, FET)**

Consommation d'énergie en production combinée (PCCE) =
consommation de combustibles - électricité auto-générée

$$E_{FET, j} = E_{FET, fuel, j} - E_{FET, elgen, j}$$

Flux d'énergie

Définitions 4

- ✓ **Consommation d'énergie primaire (PEC)**
- ✓ **Énergie primaire pour utilisations thermiques (PET)**
- ✓ **Énergie primaire pour utilisations autres (non thermiques) (PEO)**



sont obtenus à partir des **FEC, FET, FEO** s'appliquant à différents facteurs de conversion

$$E_{PEC} = f_{PE,el} E_{FEC,el} + \sum_{i=1}^{N_{fuels}} f_{PE,i} E_{FEC,fuel(i)} + f_{PE,heat} E_{FEC,heat}$$

Légende :

$i = 1, \dots, N_{combustibles}$

$N_{combustible}$ = nombre de combustibles utilisés dans la société

$f_{PE,el}$ = facteur de conversion d'énergie primaire pour l'électricité

$f_{PE,i}$ = facteur de conversion d'énergie primaire pour les combustibles

Flux d'énergie

Définitions 5

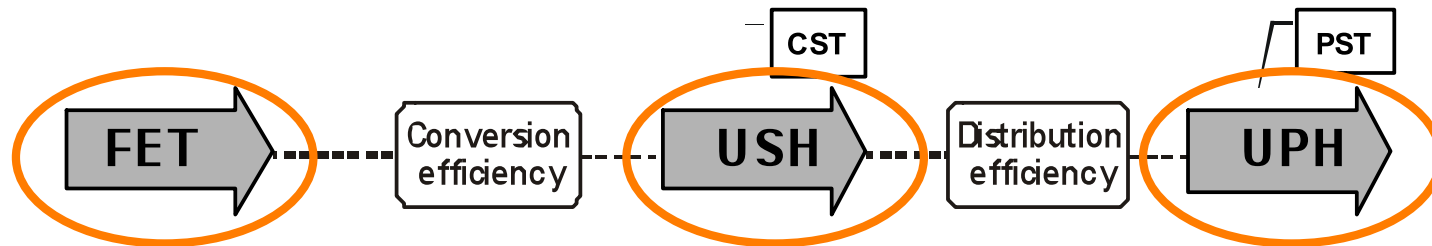
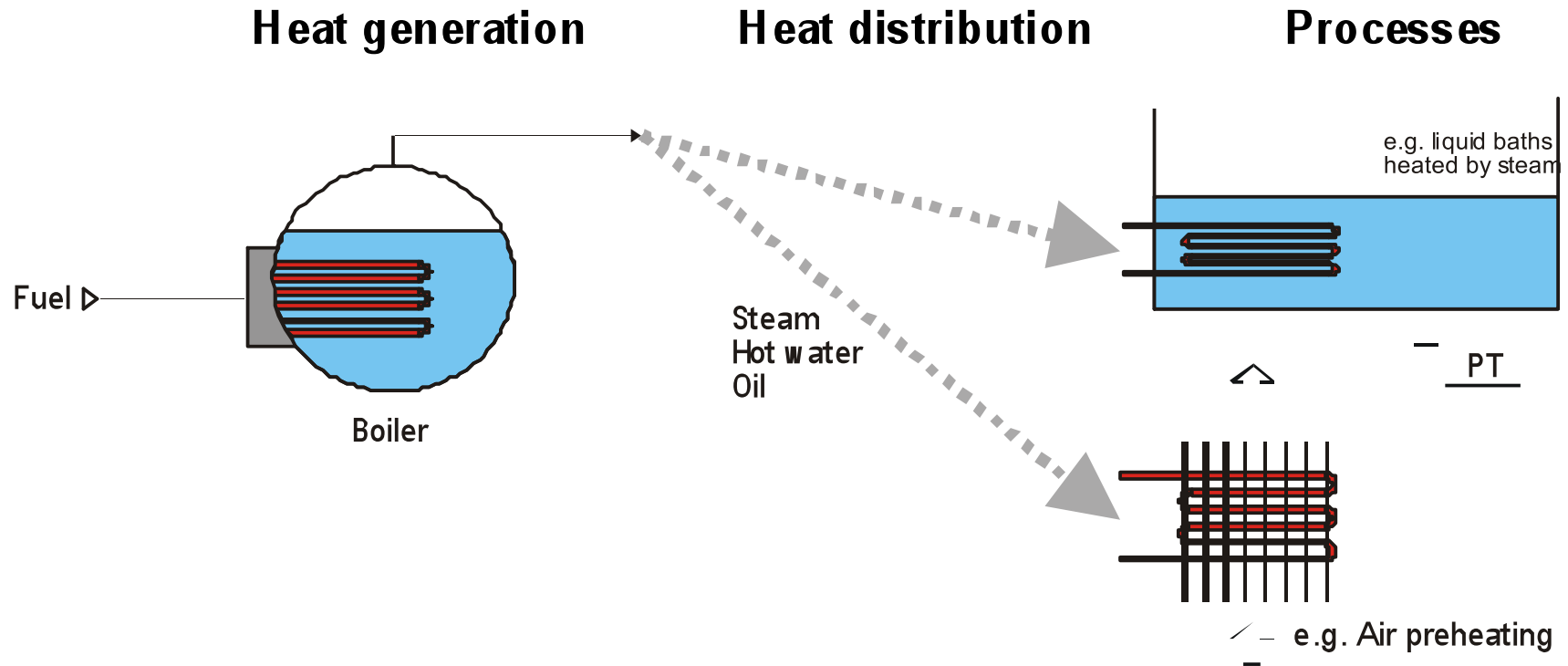
✓ **Chaleur/froid fournis utiles (USH/USC)**

Chaleur (froid) généré(e) par le système de fourniture de chaleur/froid (chaudières, brûleurs, refroidisseurs, etc.) et fourni(e) aux différents processus consommateurs de chaleur (froid) sous la forme de vapeur, d'air chaud, d'eau chaude, d'eau réfrigérée, etc.

✓ **Chaleur/froid industriels utiles (UPH/UPC)**

Chaleur (froid) fourni(e) à un processus (mesuré(e) à l'entrée de l'échangeur thermique)

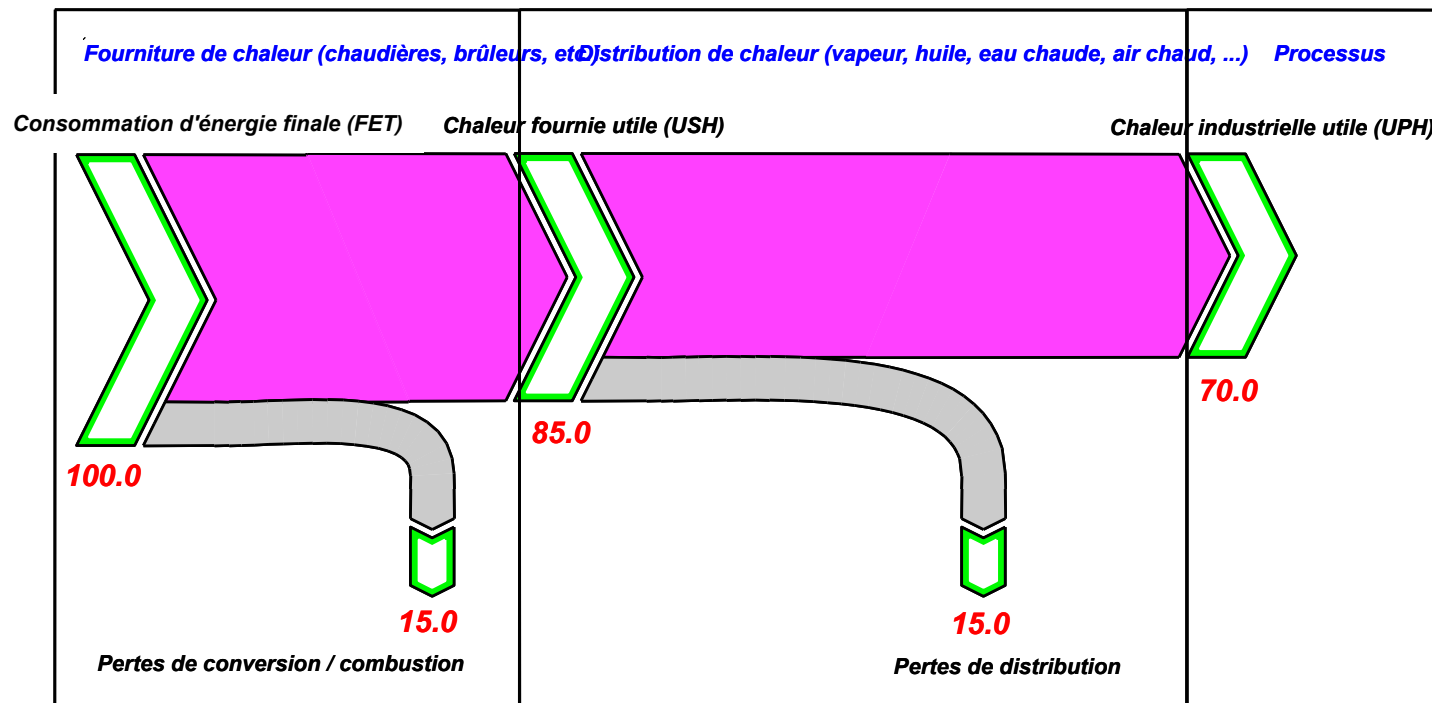
Flux d'énergie



Flux d'énergie

Définitions 6

- ✓ USH_j / FET_j = efficacité de conversion de l'équipement « j »
- ✓ UPH_m / USH_m = efficacité de distribution de la conduite « m »



Flux d'énergie

Définitions 7

✓ **Chaleur/froid résiduels disponibles (Q_{WH}/Q_{WC})**

Une flux d'énergie qui n'est pas la principale sortie d'un système :

- Gaz évacué d'une chaudière
- Condensation depuis une conduite de vapeur
- Eau chaude résiduelle au cours d'un processus de lavage
- Air froid évacué d'une chambre de refroidissement

Exemple applicable à la chaleur résiduelle industrielle :

$$Q_{QWH, Proc} = q_{m,o} (h_{po} - h_{min}) t_{op}$$

$$Q_{QWH, Proc} = m c_p (T_p - T_{min}) N$$

Légende :

q_m = débit massique

m = masse dans la citerne

N_s = nombre de démarrages

T_{OpProc} = durée du processus

Flux d'énergie

Définitions 8

✓ **Chaleur/froid résiduels récupérés (Q_{HX}/Q_{CX})**

Un flux d'énergie d'entrée dans un système à partir d'une récupération de chaleur :

- Préchauffage d'air de combustion et/ou d'eau de chaudière
- Préchauffage d'eau à l'arrivée d'un processus de lavage
- Préchauffage de retour dans un circuit de distribution d'eau chaude

✓ **Échange direct possible entre demandes de chauffage et de refroidissement (Q_{DH}/Q_{DC})**

- Demandes de refroidissement à haute température sources de récupération de chaleur
- Demandes de chauffage à basse température sources de récupération de froid

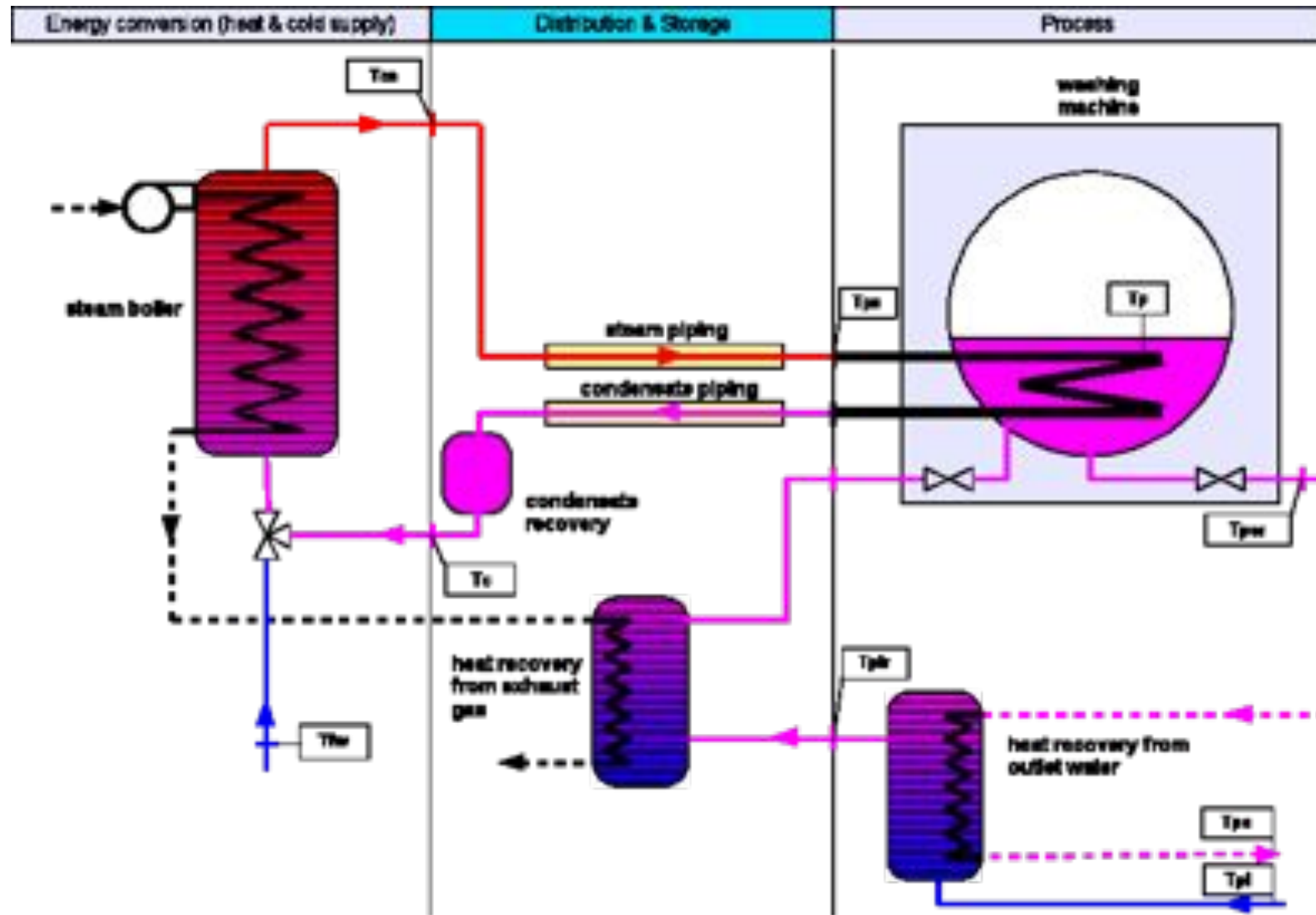
=> **Double économie de fourniture de chauffage et de refroidissement externe**

$$\sum_{h=1}^{N_{HX}} Q_{hx,h} \leq \sum_{source} Q_{QWH,source} + \sum Q_{D,cooling}$$

Légende :

N_{HX} = nombre d'échangeurs thermiques

Flux d'énergie



Un lavage industriel avec différents types de récupération de chaleur conformément au modèle Einstein

Flux d'énergie

Définitions 9

✓ Chaleur fournie utile (*USH*)

$$\dot{Q}_{USH, j} = \dot{Q}_{USH, Eq, j} + \dot{Q}_{QHX, j}$$

$\dot{Q}_{USH, Eq, j}$ = la chaleur générée dans l'équipement « j »

$\dot{Q}_{QHX, j}$ = la chaleur résiduelle récupérée utilisée dans l'équipement « j »

Légende :

$j = 1, \dots, N_{eq}$

N_{eq} = nombre d'unités d'équipement
thermique

Flux d'énergie

Définitions 10

✓ **Chaleur fournie utile (USH) par les conduites**

$$\dot{Q}_{USH, pipe, m} = \dot{Q}_{USH, m} + \dot{Q}_{QHx, m}$$

Pour les boucles ouvertes :

$$\dot{Q}_{USH, pipe, m} = q_{m, o} h_o - q_{m, ret} h_{ret} - q_{m, i} h_i$$

$\dot{Q}_{USH, pipe, m}$ = chaleur entrant dans les différentes conduites de distribution

Légende :

$m = 1, \dots, N_{conduite}$

$N_{conduite}$ = nombre de conduites de distribution

q_m = débit massique

sortie (o), retour (ret) et arrivée (i)

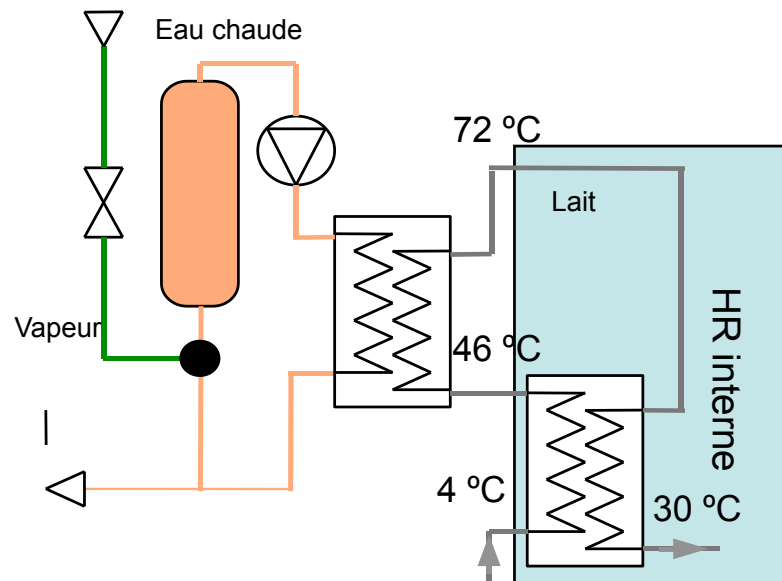
Flux d'énergie

Définitions 11

✓ Chaleur industrielle utile (UPH) : NETTE et BRUTE

$$Q_{UPH, gross} = Q_{UPH} + Q_{HX, internal, Proc}$$

$Q_{HX, internal, Proc}$ = récupération de chaleur interne



Exemple :
Processus de
pasteurisation avec
récupération de
chaleur interne

Flux d'énergie

Définitions 12

✓ **Chaleur industrielle (nette) utile (UPH)**

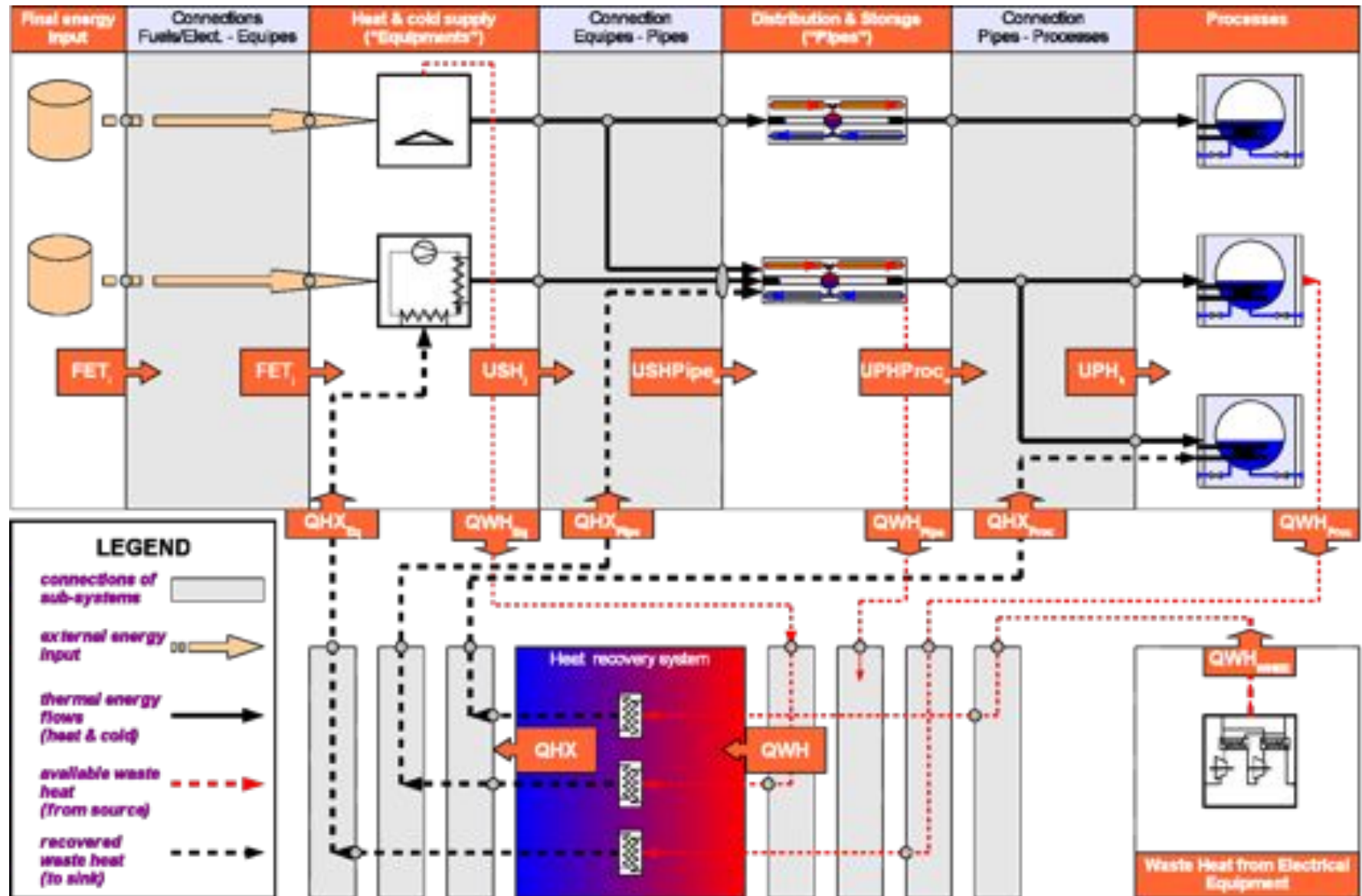
$$Q_{UPH} = Q_{UPH, Proc} + Q_{HX, Proc}$$

$Q_{UPH, Proc}$ = chaleur industrielle externe fournie au processus par le système de fourniture de chaleur

$Q_{HX, Proc}$ = chaleur industrielle externe fournie au processus par récupération de chaleur externe

Flux d'énergie

EINSTEIN thermal energy industry audit



Niveaux de température dans la fourniture de chaleur

- La récupération de chaleur et l'intégration de chaleur
- L'application de technologies plus efficaces à basse température
- La meilleure efficacité de conversion et les pertes de chaleur réduites

dépendent de...

- ✓ La **QUALITÉ** de l'énergie
 - ➔ La **TEMPÉRATURE** de l'énergie nécessaire

Niveaux de température dans la fourniture de chaleur

Classification des technologies de fourniture de chaleur par niveau de température

Intervalle de température (°C)	Niveau de température de la chaleur	Technologie de fourniture de chaleur applicable
< 60	Bas	• Pompes à chaleur basse température • Solaire thermique basse température
< 90	Moyen-bas	• Chaleur résiduelle de la production combinée (eau de refroidissement) • Limite pour le solaire thermique plat • Pompes à chaleur haute température
< 150	Moyen	• Vapeur basse pression
< 250	Moyen-haut	• Limite pour le solaire thermique moyenne température
< 400	Haut	• Limite pour la chaleur résiduelle des turbines à gaz, de la biomasse, etc.

Niveaux de températures dans la fourniture de chaud et de froid

Définitions 13

✓ **Température de processus (PT)**

Température du fluide actif dans un processus

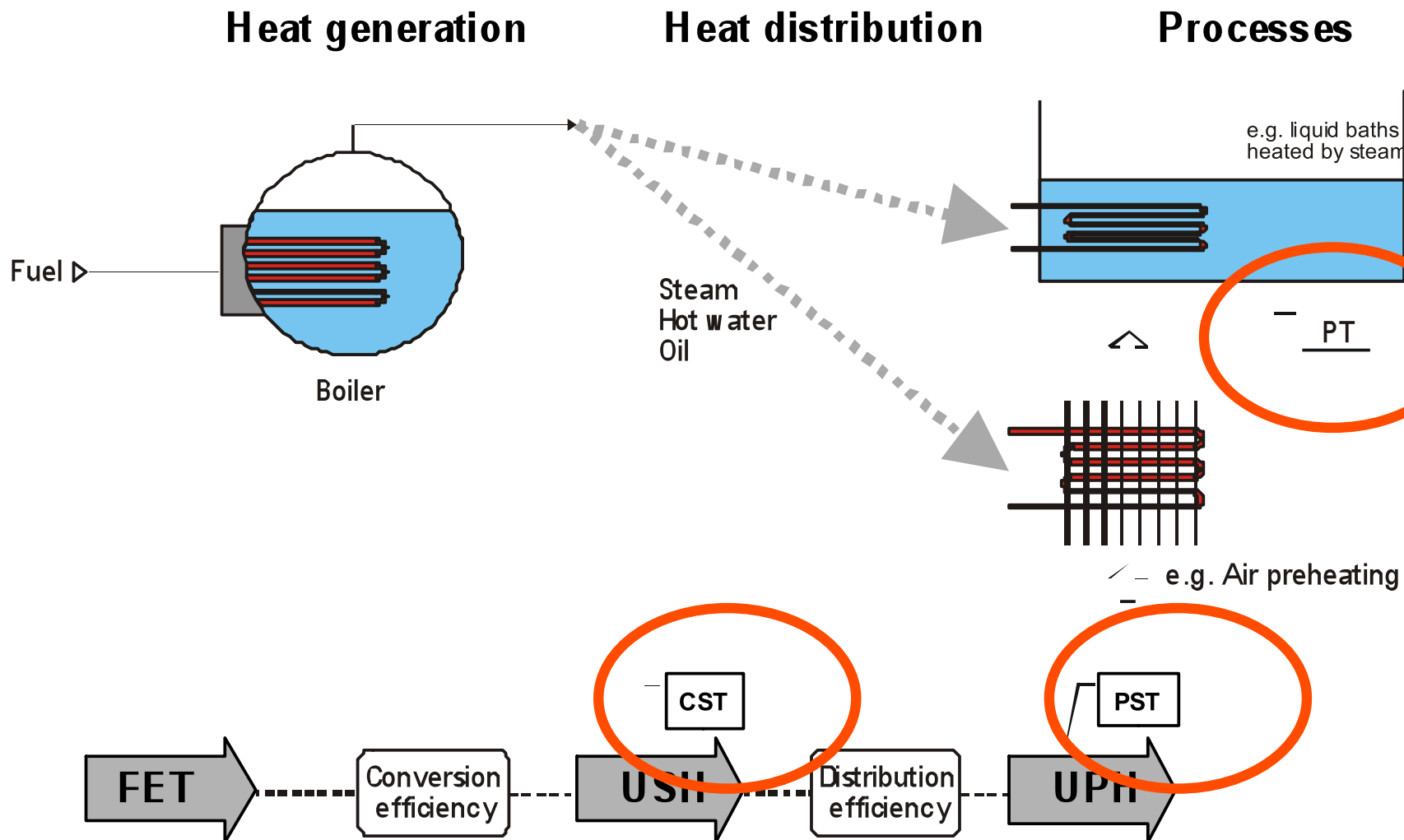
✓ **Température de fourniture du processus (PST)**

Température d'arrivée du fluide caloporteur utilisé pour le chauffage ou le refroidissement

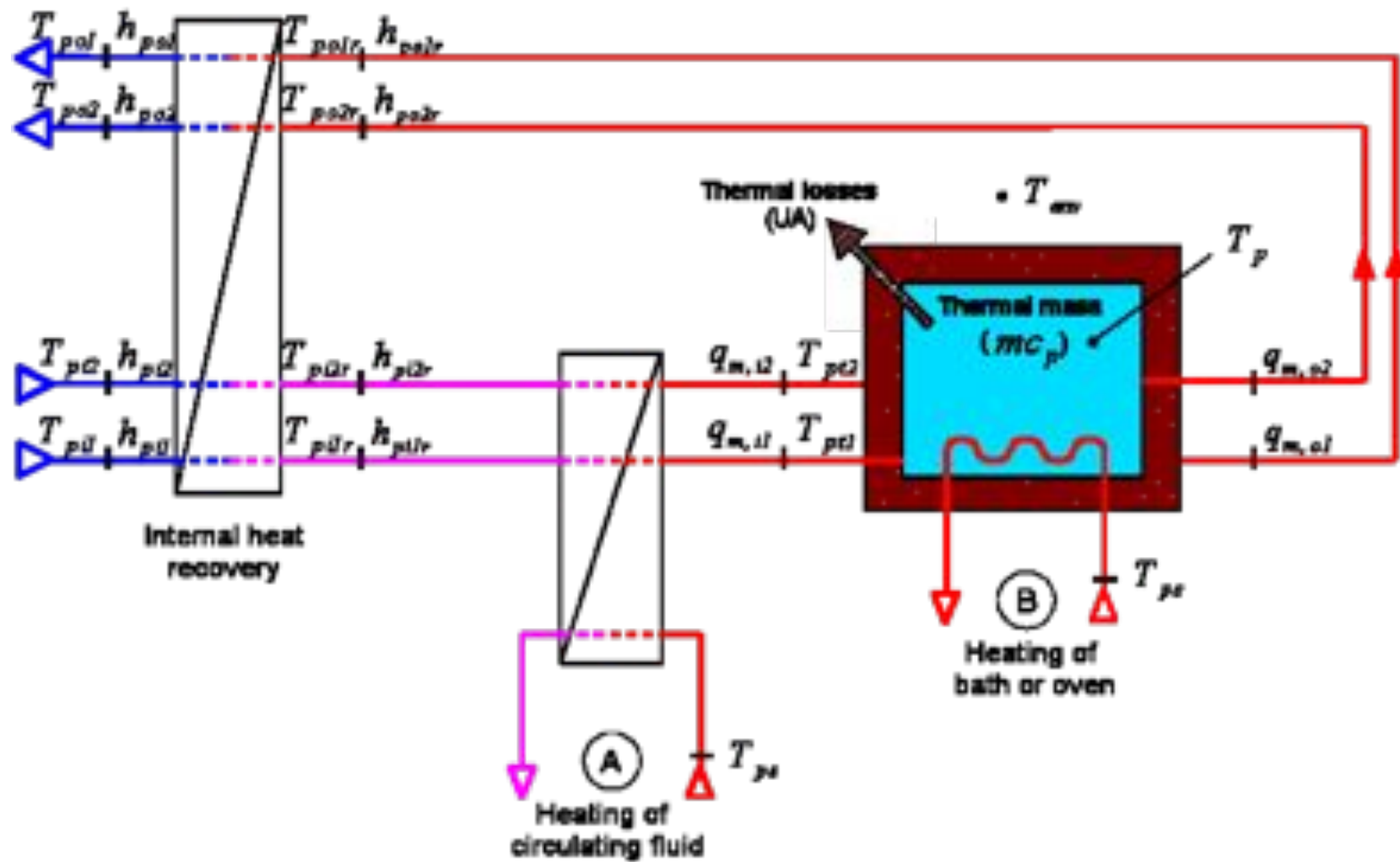
✓ **Température de l'alimentation centrale (CST)**

Température du fluide caloporteur à la sortie du système central de fourniture de chaleur ou de froid (par ex. chaudière, refroidisseur)

Niveaux de température dans la fourniture de chaleur



Modèle du processus



Modèle du processus

Composants de la demande totale en chaleur du processus :

1. Chaleur de circulation (Q_{UPHc})
2. Chauffage initial au démarrage (Q_{UPHs})
3. Chaleur de maintenance (Q_{UPHm})

$$Q_{UPH} = Q_{UPHc} + Q_{UPHs} + Q_{UPHm}$$

Modèle du processus

Définitions 14

1. Chaleur de circulation (Q_{UPHc})

$$Q_{UPH,c}^{gross} = Q_{UPH,c} + Q_{HX,internal} = m_c c_p (T_p - T_{pi})$$

$$Q_{UPH,c} = m_c c_p (T_p - T_{pir})$$

Modèle du processus

Définitions 15

2. Chauffage initial au démarrage (Q_{UPHs})

$$Q_{UPH,s} = N_s (m c_p)_e (T_p - T_s)$$

$(m c_p)_e$ = masse thermique équivalente
(inertie thermique du fluide porteur + équipement)

3. Chaleur de maintenance (Q_{UPHm})

$$Q_{UPH,m} = [(UA)(T_p - T_{env}) + \dot{Q}_L] t_{op}$$

UA = coefficient de perte thermique

\dot{Q}_L = puissance requise pour le changement de phase
(chaleur latente) ou pour les réactions chimiques

Modèle du processus

Exemple 1 : coagulation du lait

Description du processus :

- ✓ Le lait est issu d'un traitement préalable à 32 °C et doit être chauffé à la température de processus de 40 °C
- ✓ Durant 4h, le lait est maintenu à 40 °C
- ✓ Au terme du processus, les produits sont extraits de la cuve à environ 40 °C

Représentation dans le modèle de processus EINSTEIN :

- ✓ Chaleur de circulation : préchauffage du lait entrant de 32 à 40 °C
- ✓ Chaleur au démarrage : pas de démarrage puisque la citerne est vide au début du processus
- ✓ Chaleur de maintenance : demande de chaleur requise pour maintenir la citerne à 40 °C
- ✓ Chaleur résiduelle : chaleur contenue dans les produits

Modèle du processus

Exemple 1 : coagulation du lait

Processes description

Process short name	milk coagulation		
Description			
Process type	batch		v
Unit operation type	Cooking and boiling		v
Product or process medium	milk		v
Typical (final) temperature of the process medium during operation	40.0	°C	v
Inlet temperature of the process medium (before heat recovery)	30.0	°C	v
Start-up temperature of process medium (after break)		°C	v
Daily inflow of process medium	100.0	m ³	v
Volume of the process medium within the equipment or storage	0.0	m ³	v
Power requirement of the process in operation	5.0	kW	v

Schedule

Hours of process operation per day	12.0	h	v
Number of batches per day	3.0		
Duration of 1 batch	4.0	h	v
Days of process operation per year	360.0		

Modèle du processus

Exemple 2 : laveuse de bouteilles

Description du processus :

- ✓ Les laveuses de bouteilles utilisent un circuit d'eau fermé / un bain d'eau à environ 75 – 85°C

Représentation dans le modèle de processus EINSTEIN :

- ✓ Chaleur de circulation : préchauffage des bouteilles entrantes à la température du bain ; préchauffage d'une petite fraction d'eau fraîche (=> première estimation rapide : tous les deux ignorés ...)
- ✓ Chaleur au démarrage : chauffage d'un bain d'eau après des pauses d'une nuit ou d'un week-end
- ✓ Chaleur de maintenance : demande de chaleur requise pour maintenir le bain à la température de processus (environ 80 °C)
- ✓ Chaleur résiduelle : chaleur contenue dans les bouteilles propres

Modèle du processus

Exemple 2 : laveuse de bouteilles

Processes description			
Process short name	Bottle washer		
Description			
Process type	continuous		v
Unit operation type	Clearing of bottles and casks		v
Product or process medium	water		v
Typical (final) temperature of the process medium during operation	65.0	°C	v
Inlet temperature of the process medium (before heat recovery)		°C	v
Start-up temperature of process medium (after breaks)	55.0	°C	v
Daily inflow of process medium	0.0	m ³	v
Volume of the process medium within the equipment or storage	20.0	m ³	v
Power requirement of the process in operation	10.0	kW	v
Schedule			
Hours of process operation per day	14.0	h	v
Number of batches per day	1.0		
Duration of 1 batch	14.0	h	v
Days of process operation per year	260.0		

Modèle du processus

Exemple 3 : séchage du malt

Description du processus :

- ✓ Le malt est séché dans un flux d'air chaud à 60 °C

Représentation dans le modèle de processus EINSTEIN :

- ✓ Chaleur de circulation : préchauffage du flux d'air extérieur à 60 °C
- ✓ Chaleur au démarrage : pas d'apport calorique externe supplémentaire
- ✓ Chaleur de maintenance : pas d'apport calorique supplémentaire, la température est maintenue par le flux d'air chaud entrant
- ✓ Chaleur résiduelle : chaleur contenue dans l'air humide

Modèle du processus

Exemple 3 : séchage du malt

Processes description			
Process short name	Malt drying		
Description			
Process type	continuous		▼
Unit operation type	Drying		▼
Product or process medium	Ap		▼
Typical (final) temperature of the process medium during operation	60.0	°C	▼
Inlet temperature of the process medium (before heat recovery)	15.0	°C	▼
Start-up temperature of process medium (after break)		°C	▼
Daily inflow of process medium	10 000.0	m ³	▼
Volume of the process medium within the equipment or storage	0.0	m ³	▼
Power requirement of the process in operation	0.0	MW	▼
Schedule			
Hours of process operation per day	24.0	h	▼
Number of batches per day	1.0		
Duration of 1 batch	24.0	h	▼
Days of process operation per year	350.0		

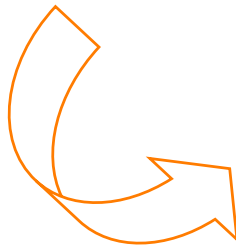
Suppositions du modèle

- ✓ Niveaux de température constants
Températures d'arrivée, de processus (définie) et de la chaleur résiduelle constantes
- ✓ Dépendance temporelle :
 - même planning pour tous les flux d'entrée
 - même planning pour tous les flux de sortie (flux de déchets)
 - tous les composants de la demande en chaleur de processus varient proportionnellement

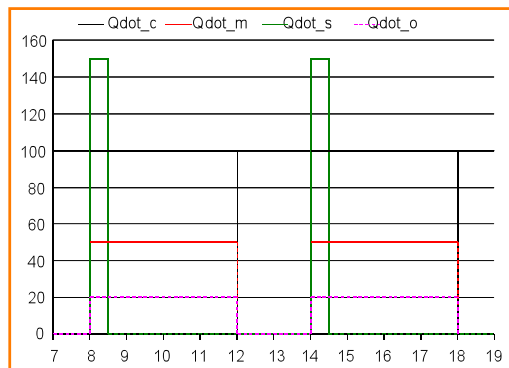
Profil de la demande

Le processus peut être :

- ✓ Continu
- ✓ Par lots



Dépendance temporelle de la demande en chaleur et disponibilité de la chaleur résiduelle :



- ✓ Planning pour les flux entrants

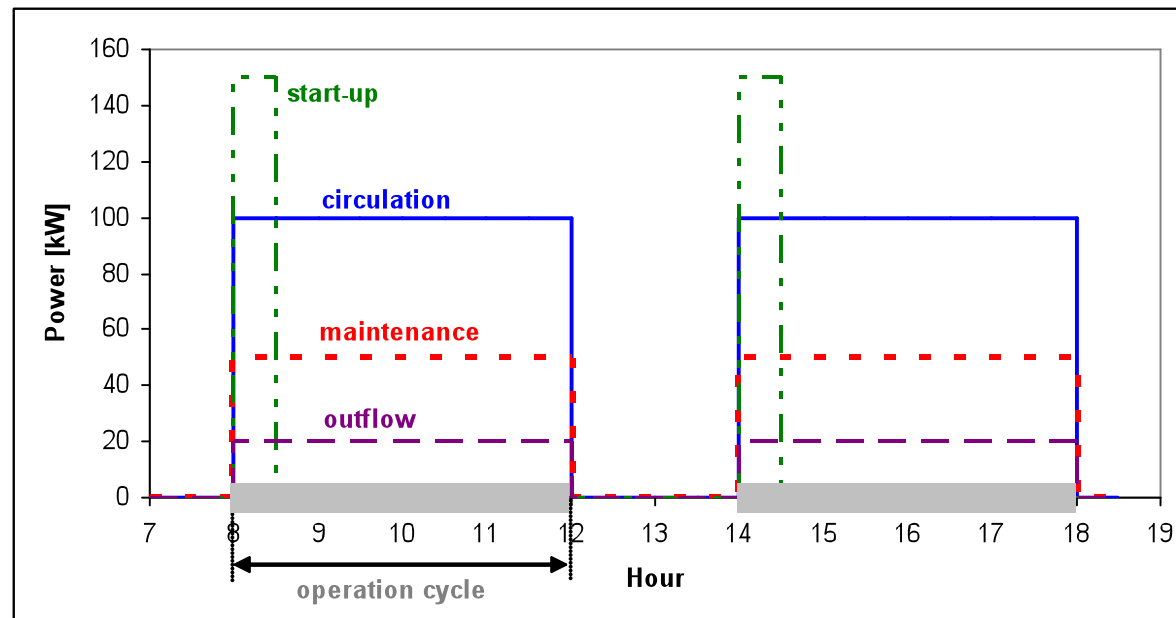
Planning pour le chauffage initial au démarrage

- ✓ Planning pour le fonctionnement du processus
- ✓ Planning pour les flux sortants

Profil de la demande

Planning du processus par défaut : processus continu

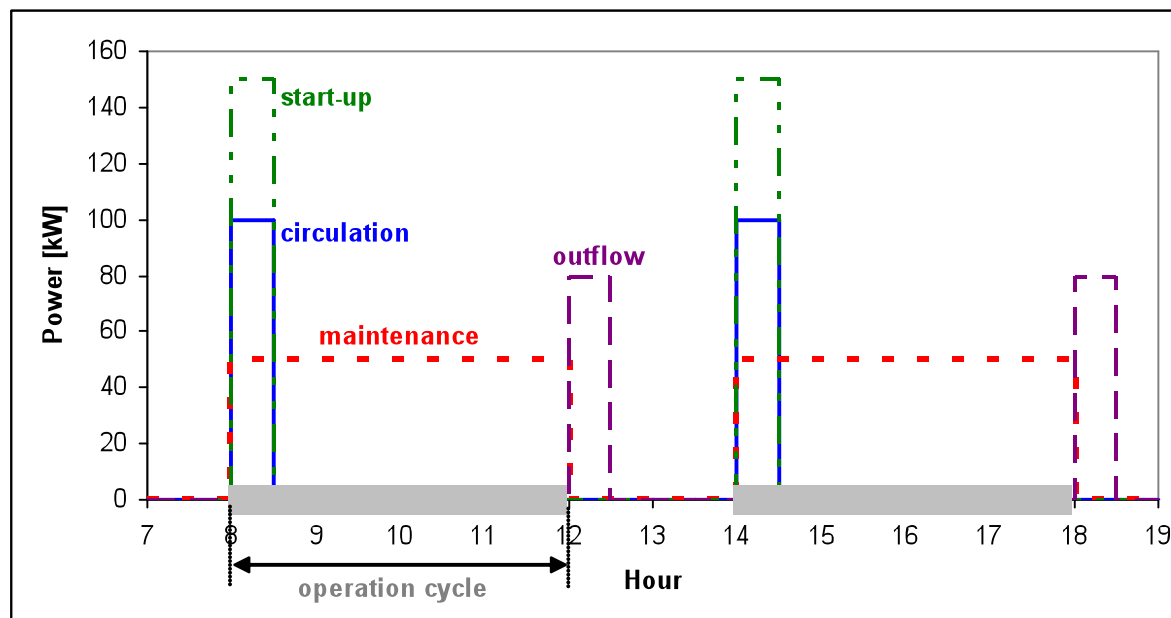
	Processus continu
Circulation (flux d'entrée)	Continu durant t_{op}
Départ	Les premiers 20 % de la durée totale pendant t_{op}
Maintenance	Continu durant t_{op}
Évacuation des fluides résiduels (flux de sortie)	Continu durant t_{op}



Profil de la demande

Planning du processus **par défaut** : processus **par lots**

	processus par lots
Circulation (flux d'entrée)	Les premiers 20 % de la durée totale <u>pendant</u> t_{op}
Départ	Les premiers 20 % de la durée totale <u>pendant</u> t_{op}
Maintenance	Continu durant t_{op}
Évacuation des fluides résiduels (flux de sortie)	Les premiers 20 % de la durée totale <u>après</u> t_{op}



Bâtiments dans EINSTEIN

Dans EINSTEIN, les demandes en énergie des bâtiments sont modelées en tant que processus

Composant de la demande de processus	chauffage de locaux	climatisation de locaux	Eau chaude sanitaire
Circulation (flux d'entrée)	Chauffage de l'air frais	Refroidissement de l'air frais Déshumidification de l'air frais	Chauffage de l'air froid
Départ	Chauffage / refroidissement initiaux avant des périodes d'occupation -		-
Maintenance	demande en énergie pour le chauffage / refroidissement, à l'exception du renouvellement de l'air		-
Flux de sortie	air évacué (utile pour la récupération dans la ventilation contrôlée uniquement)		Eau résiduelle
Température de processus	Température intérieure souhaitée		Température de l'eau chaude (points de consommation)
Température de fourniture de processus	Température d'arrivée du fluide porteur dans le système de chauffage/climatisation (par ex. eau, air chaud/froid)		Température de l'eau chaude (distribution)