

MODULE 2.1

Efficacité énergétique dans EINSTEIN

Optimisation de processus et récupération de chaleur

Conception conceptuelle des options d'économies et ciblage préliminaire des énergies

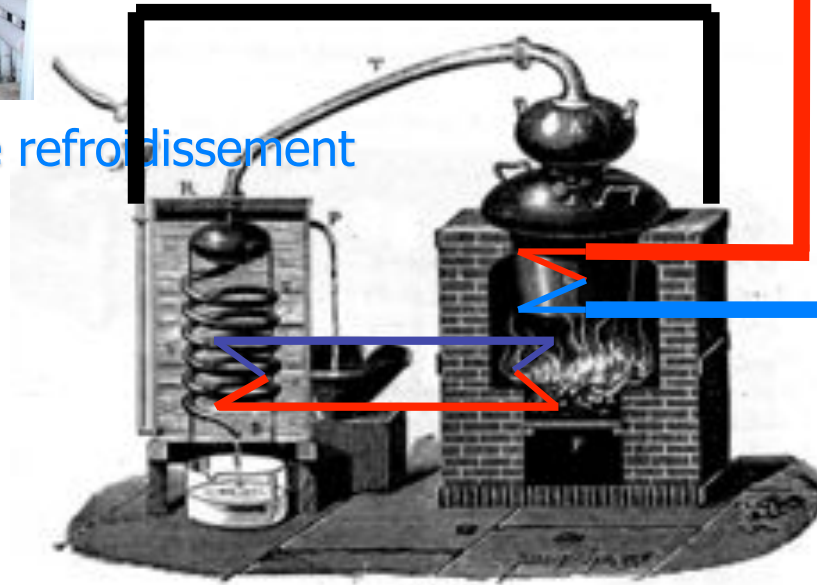
EINSTEIN est logique,
les économies d'énergie passent donc
avant tout !

- ✓ Au niveau de l'offre
- ✓ Au niveau de la demande

ÉTAPE 7 : conception conceptuelle des options d'économies et ciblage préliminaire des énergies



Système de refroidissement



Distillation

Optimisation du processus



énergie
renouvelable



Système de
chauffage

ÉTAPE 7 : conception conceptuelle des options d'économies et ciblage préliminaire des énergies

Étapes de l'économie d'énergie :

- Réduction de la chaleur industrielle par l'**optimisation du processus**
- Réduction de la fourniture en chaleur nécessaire par **la récupération de chaleur et l'intégration au processus**
- Cogénération et polygénération
- Technologies de fourniture économes en énergie et sources d'économies renouvelables **selon des considérations exergétiques**

ÉTAPES 7.1 et 7.2 :

optimisation du processus et économies au niveau de la demande

✓ OBJECTIF

- Améliorations énergétiques des processus de production
- Réduction de la demande en énergie des bâtiments

✓ Sources des mesures d'efficacité énergétique

- Documents de référence MTD (BREF)
- Rapport EINSTEIN sur le thème « *Energy Auditing Practices and Tools* » (« Outils et pratiques de l'audit énergétique » - rapport incluant les outils pour l'optimisation de la construction)
- **Base de données Einstein sur l'optimisation du processus...**

ÉTAPES 7.1 et 7.2 :

optimisation du processus et économies au niveau de la demande

..une **base de données** pour l'efficacité énergétique

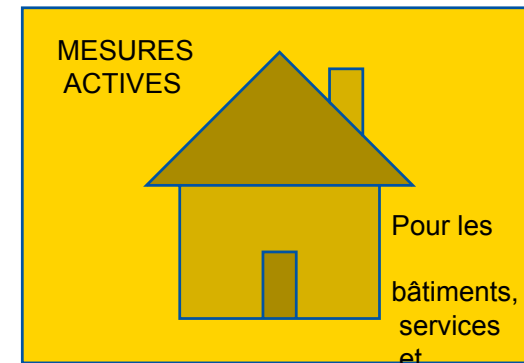
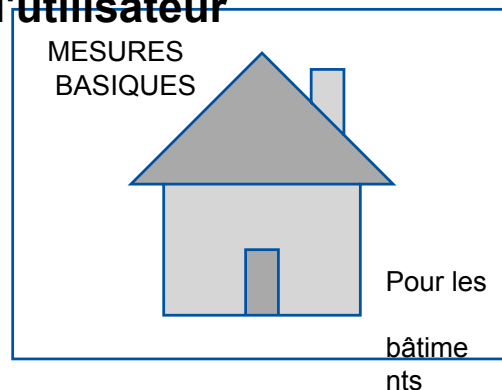
- ✓ Mesures / méthodologies d'économie d'ordre général
 - Par ex. utilisation en cascade de l'eau de lavage etc.
- ✓ Différentes technologies pour une opération
 - Par ex. évaporation : recompression thermique de la vapeur, recompression mécanique de la vapeur, évaporation sous vide etc.
- ✓ Mesures efficaces qui peuvent être appliquées à des technologies spécifiques
 - Par ex. récupération de la chaleur résiduelle, régulation optimisée du séchage
- ✓ Applicabilité des technologies/mesures à différents secteurs
 - Permettant la synergie entre les solutions appliquées dans différents secteurs

ÉTAPES 7.1 et 7.2 : optimisation du processus pour les bâtiments

- **EINSTEIN** utilise la demande de chauffage des bâtiments comme entrée pour l'optimisation du système.
- Concernant les bâtiments, des mesures **BASIQUES** et **ACTIVES** relatives aux services et aux utilisateurs peuvent être définies.

- ✓ système de chauffage optimisé
- ✓ utilisation de sources d'énergies renouvelables
- ✓ système de contrôle du chauffage optimisé
- ✓ système de ventilation optimisé
- ✓ ~~comportement / briefing de~~

l'utilisateur



utilisateu
rs

- ✓ isolation extérieure complète
- ✓ optimisation thermique des portes et fenêtres
- ✓ étanchéité à l'air
- ✓ ombre externe
- ✓ refroidissement naturel

ÉTAPES 7.1 et 7.2 : optimisation du processus pour les bâtiments

Dans l'UE, les zones climatiques peuvent être divisées entre zones *chaudes*, *tempérées* et *froides* en fonction des facteurs suivants :

- ✓ **température extérieure la plus basse et moyenne durant le temps de chauffage**
- ✓ **la température externe moyenne durant l'été**
- ✓ **les degrés-jours de chauffage**
- ✓ **le rayonnement solaire**

ÉTAPES 7.1 et 7.2 : optimisation du processus pour les bâtiments

...pour le chauffage et la climatisation dans les
différentes zones climatiques

...concernant*	les zones chaudes	les zones tempérées	les zones froides
Chauffage	<p>isolation, étanchéité à l'air et système de ventilation optimisé</p>	<p>isolation, étanchéité à l'air et système de ventilation et de chauffage optimisé</p>	<p>isolation, étanchéité à l'air et système de ventilation et de chauffage optimisé</p>
Refroidissement	<p>refroidissement naturel, ombre externe, comportement / briefing de l'utilisateur et ventilation optimisée</p>	<p>ombre externe, comportement / briefing de l'utilisateur</p>	<p>comportement / briefing de l'utilisateur et ombre externe</p>

* Source : AEE INTEC, vérifiée par les partenaires du projet SQUARE

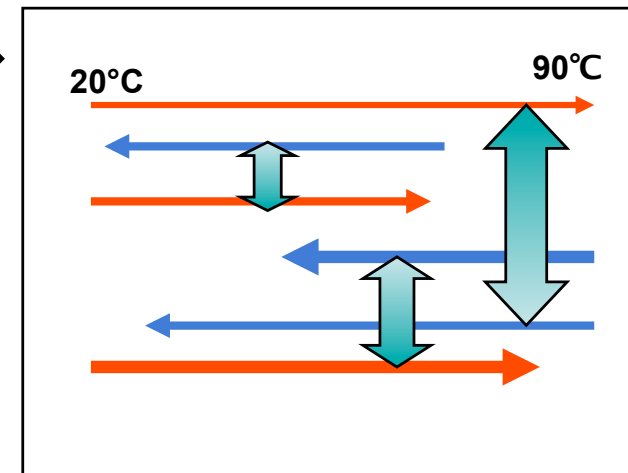
Étapes 7.3 et 7.4 : potentiel théorique de récupération de chaleur et préconception d'échangeurs thermiques et de stockage

7.3. POTENTIEL de récupération de chaleur

- ✓ Analyse d'une demande minimale externe en chaleur et froid
- ✓ Potentiel de récupération de chaleur

7.4. Conception de réseaux d'échangeurs thermiques :

- ✓ Conception et optimisation d'un réseau d'échangeurs thermiques
- ✓ Réduction de la demande en énergie et des niveaux de température requis → bases pour l'intégration exergétique optimisée de fourniture de chaud et de froid



Étapes 7.3 et 7.4 : potentiel théorique de récupération de chaleur et préconception d'échangeurs thermiques et de stockage

- ✓ Positionnement de la conception du système de récupération de la chaleur dans la méthodologie d'audit :
- ✓ Avant la conception d'un nouveau système de fourniture d'énergie
- ✓ Recalcul possible avec de nouveaux systèmes de fourniture
 - Les flux d'énergie basés sur le matériel de production thermique pourraient changer

Étapes 7.3 : potentiel théorique de récupération de chaleur

✓ Objectif :

Potentiel théorique d'économies d'énergie par récupération de chaleur (avant la conception de systèmes de fourniture d'énergie)

- Économisez les combustibles et évitez le surdimensionnement de l'équipement de fourniture

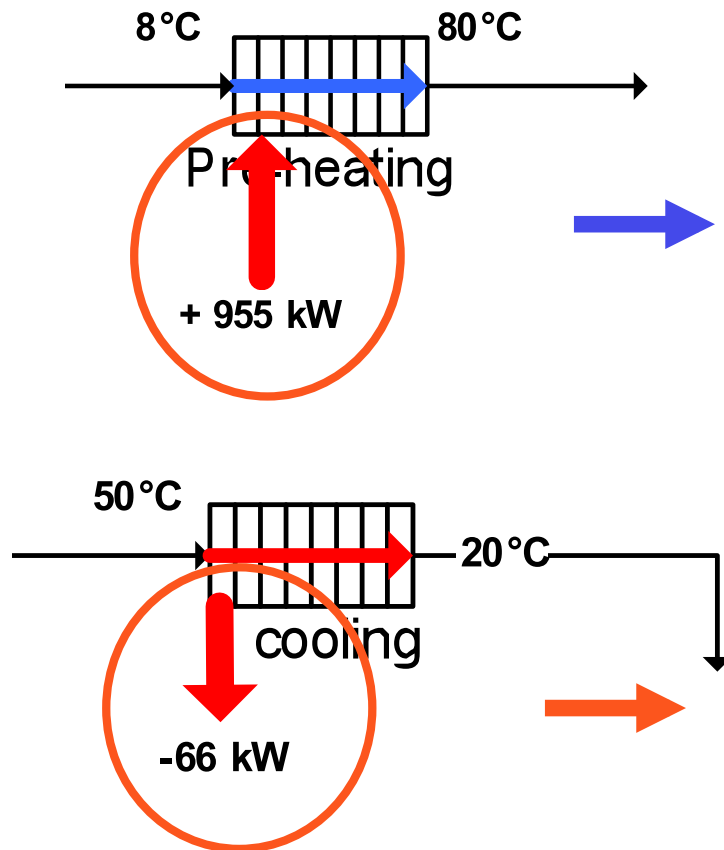
✓ Méthodologie

- De la fourniture en énergie et des processus vers les « flux »
- Analyse de pincement
 - Courbe composite du chaud et du froid
 - Courbe composée globale

✓ Résultats :

- potentiel théorique de récupération de chaleur
- Fourniture externe nécessaire de chaud/froid aux différents niveaux de température

Étapes 7.3 : potentiel théorique de récupération de chaleur



Les « *flux froids* » doivent être chauffés

Tout processus dans lequel **une entrée d'énergie est nécessaire** pour le chauffage du flux de processus

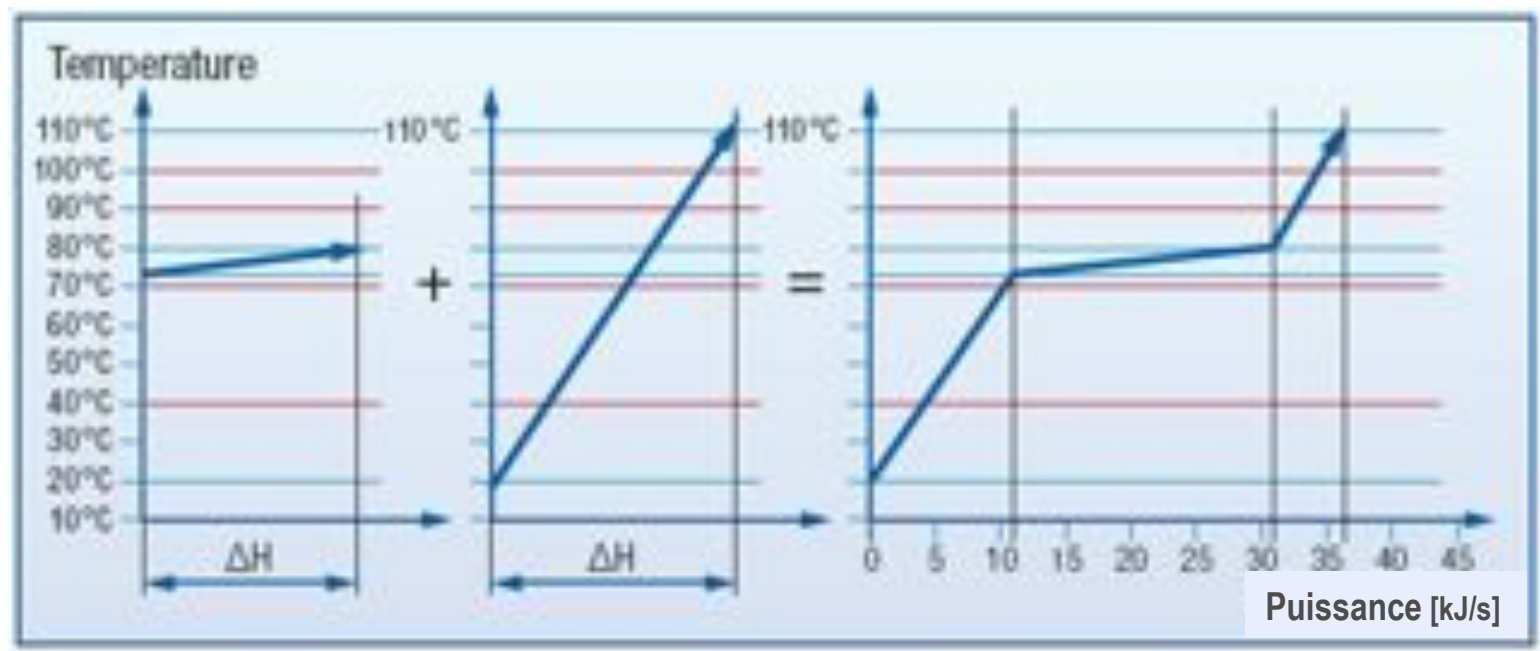
Les « *flux chauds* » doivent être refroidis

Tout processus dans lequel **une entrée d'énergie est retirée** pour le refroidissement du flux de processus

Étapes 7.3 : potentiel théorique de récupération de chaleur

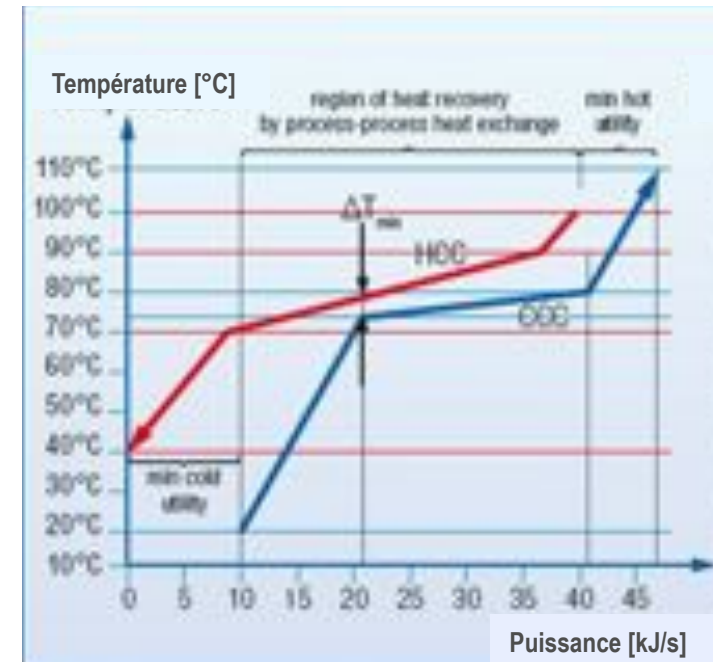
✓ Courbes composites :

Ajout de vecteurs représentant la demande en énergie en puissance et en température (= flux d'énergie)



Étapes 7.3 : potentiel théorique de récupération de chaleur

- ✓ Courbes composite du chaud et du froid
- ✓ Température de pincement – séparation du système de production en deux moitiés :
 - Au dessus du pincement : pas de refroidissement nécessaire
 - En dessous du pincement : pas de chauffage nécessaire
 - Aucune énergie ne doit être transférée de l'autre côté du pincement (utilisation thermodynamique efficace de l'énergie)

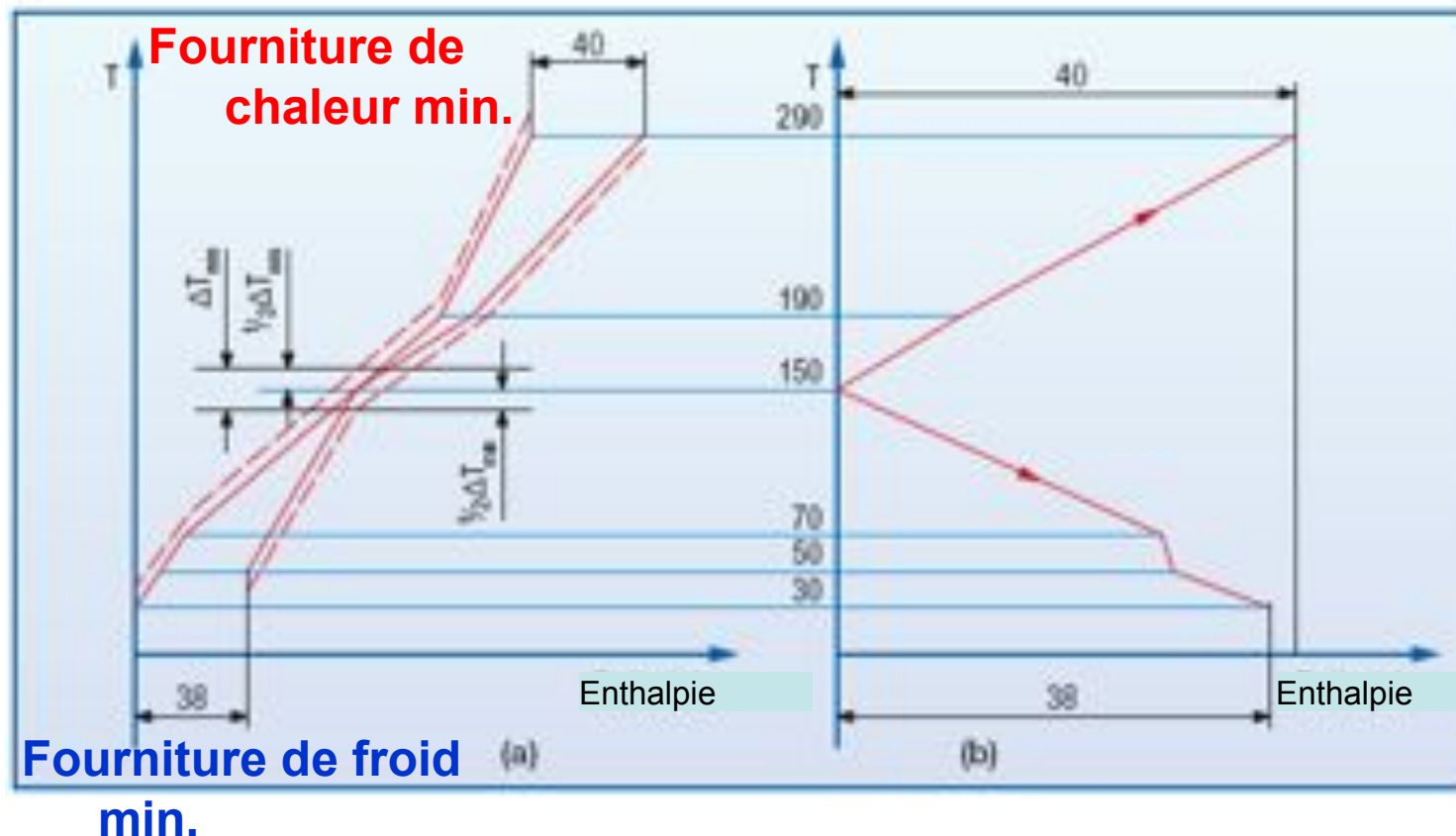


Étapes 7.3 : potentiel théorique de récupération de chaleur

✓ Courbe composée globale (CCG)

✓ Elle montre

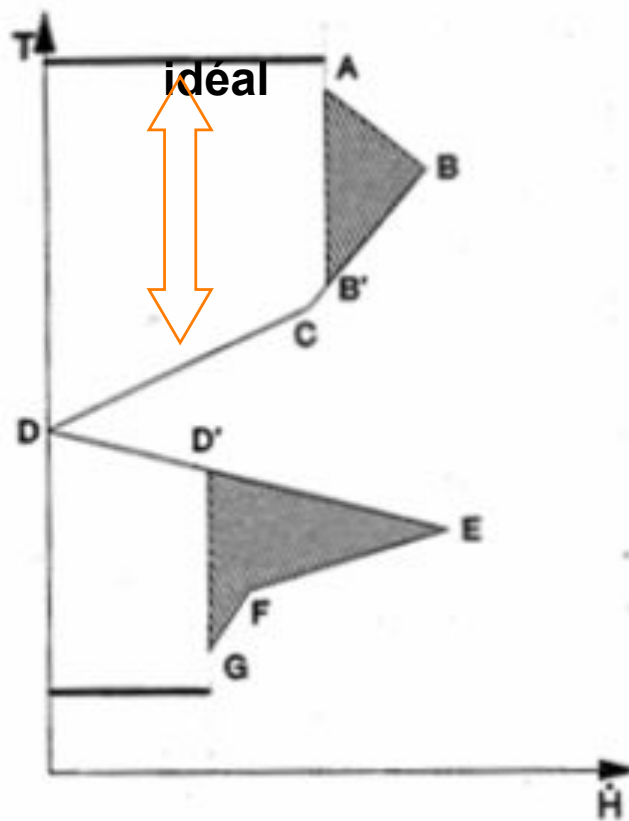
- La fourniture d'énergie externe idéale nécessaire pour réchauffer ou refroidir les flux.
- À quelle température les ressources externes doivent être fournies



Étapes 7.3 : potentiel théorique de récupération de chaleur

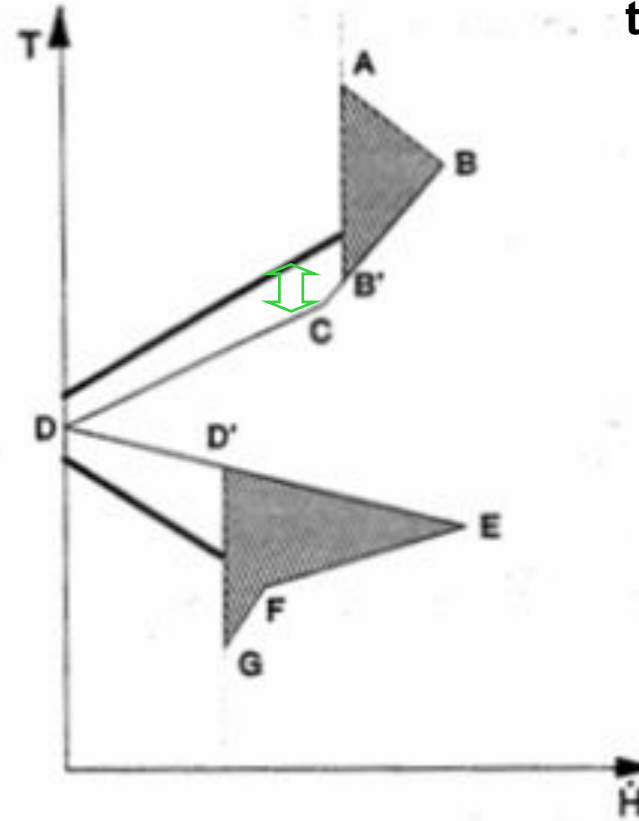
- ✓ Courbe composée globale (CCG) et fourniture de chaleur

(a) perte exergetique élevée



(a)

(b) niveau de température



(b)

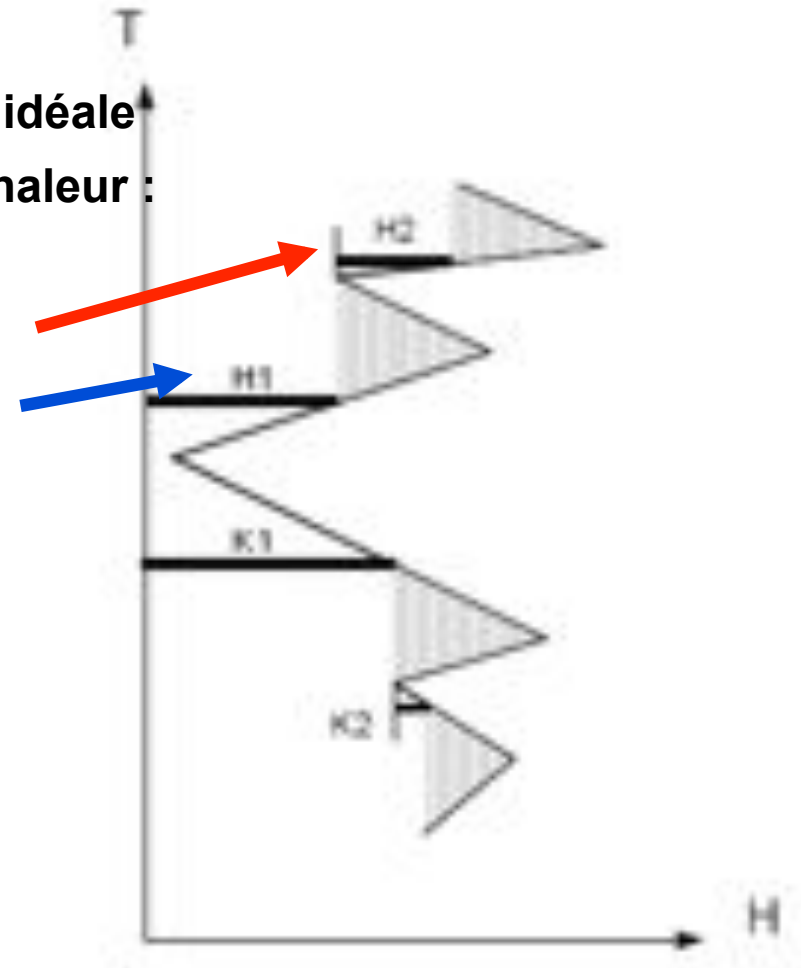
Étapes 7.3 : potentiel théorique de récupération de chaleur

✓ Courbe composée globale (CCG) et fourniture de chaleur

Approximation de la température idéale par cascade de la fourniture de chaleur :

H2 : fourniture de chaleur haute température

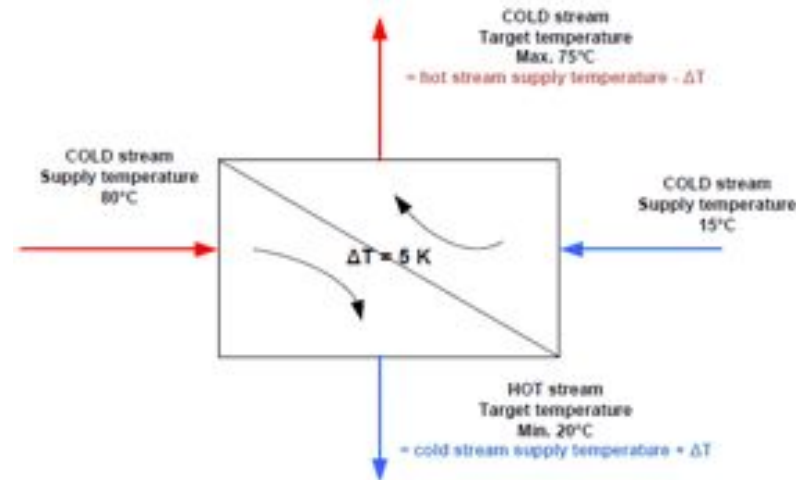
H1 : fourniture de chaleur basse température



Étapes 7.3 : potentiel théorique de récupération de chaleur

✓ Choix de ΔT_{\min} pour un premier concept

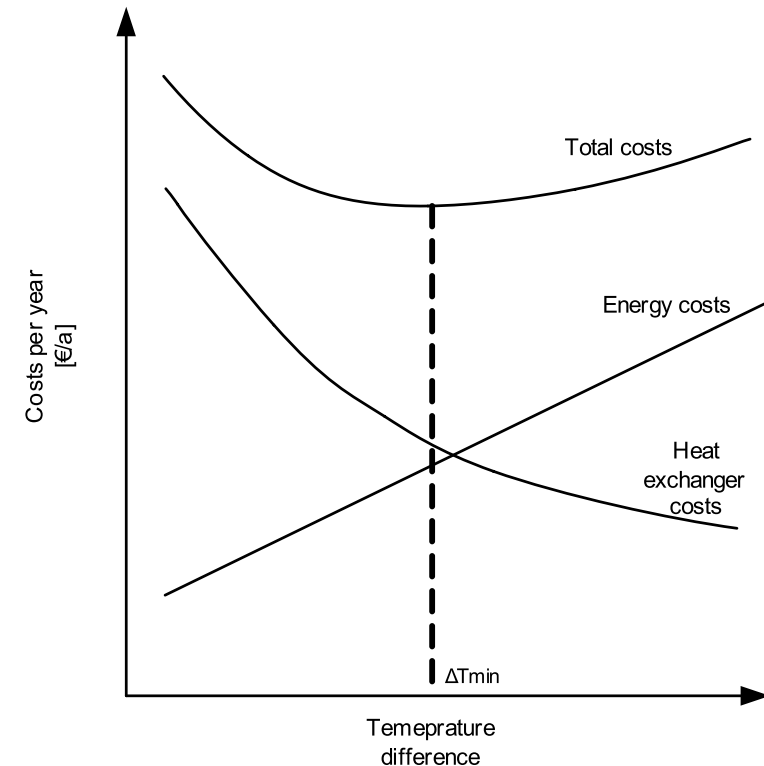
- ✓ Dans un échangeur thermique à contre-courant, la température finale du flux froid peut atteindre au maximum la température initiale du flux chaud moins ΔT_{\min} .
- ✓ Dans un échangeur thermique à contre-courant, la température finale du flux chaud peut atteindre au minimum la température initiale du flux froid plus ΔT_{\min} .



$$H[\text{kW}] = m_{hs} * c_{p_{hs}} * (T_{\text{supply}_{hs}} - T_{\text{target}_{hs}}) = m_{cs} * c_{p_{cs}} * (T_{\text{target}_{cs}} - T_{\text{supply}_{cs}})$$

Étapes 7.3 : potentiel théorique de récupération de chaleur

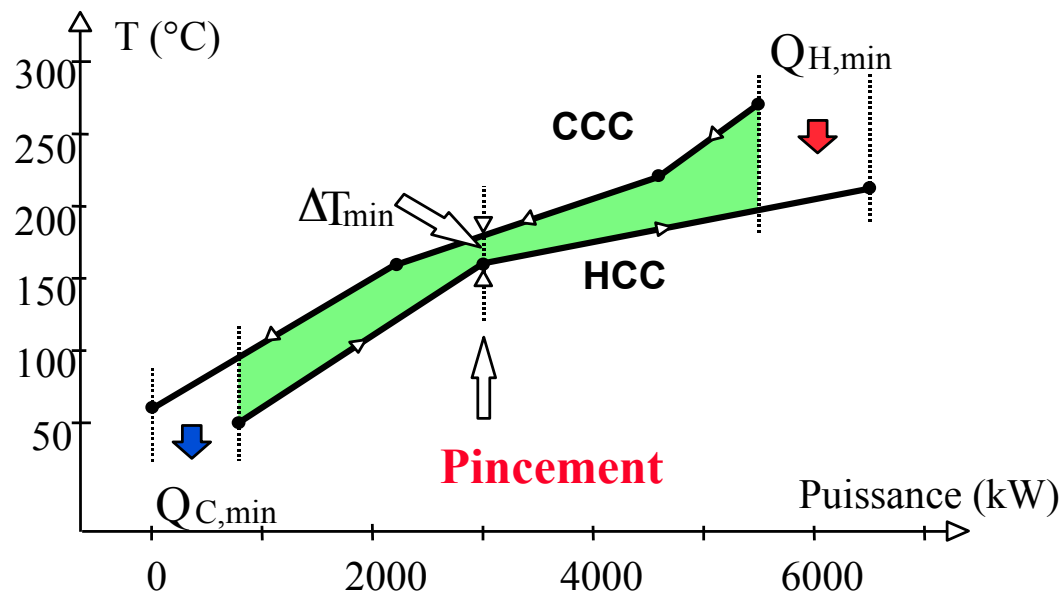
- ✓ Optimisation économique
 - ✓ Coûts d'investissement : **surface du transfert de chaleur**, température, pression, matière de l'échangeur thermique, connexions, etc.
 - ✓ Économies d'énergie : **Coefficient de transfert de chaleur** (caractéristiques du flux, paramètres du fluide, matériau, etc.), **différence de température logarithmique** entre les fluides, **surface du transfert de chaleur**



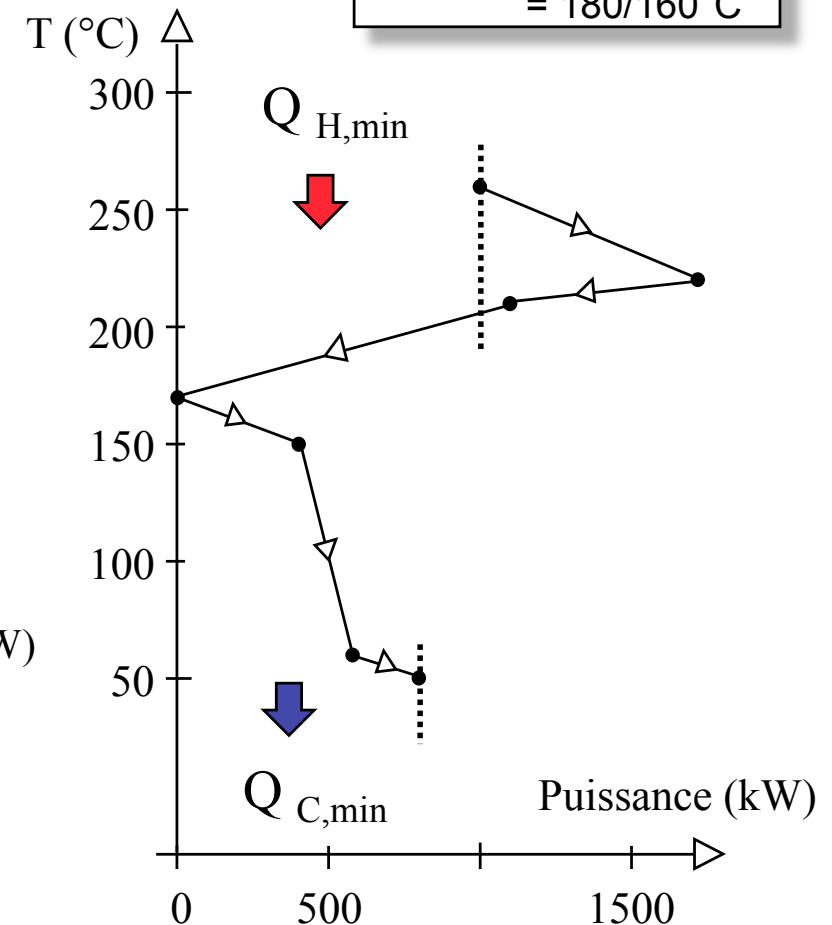
Étapes 7.3 : potentiel théorique de récupération de chaleur

✓ Analyse de pincement

- Courbe composite du chaud et du froid
- Courbe composée globale

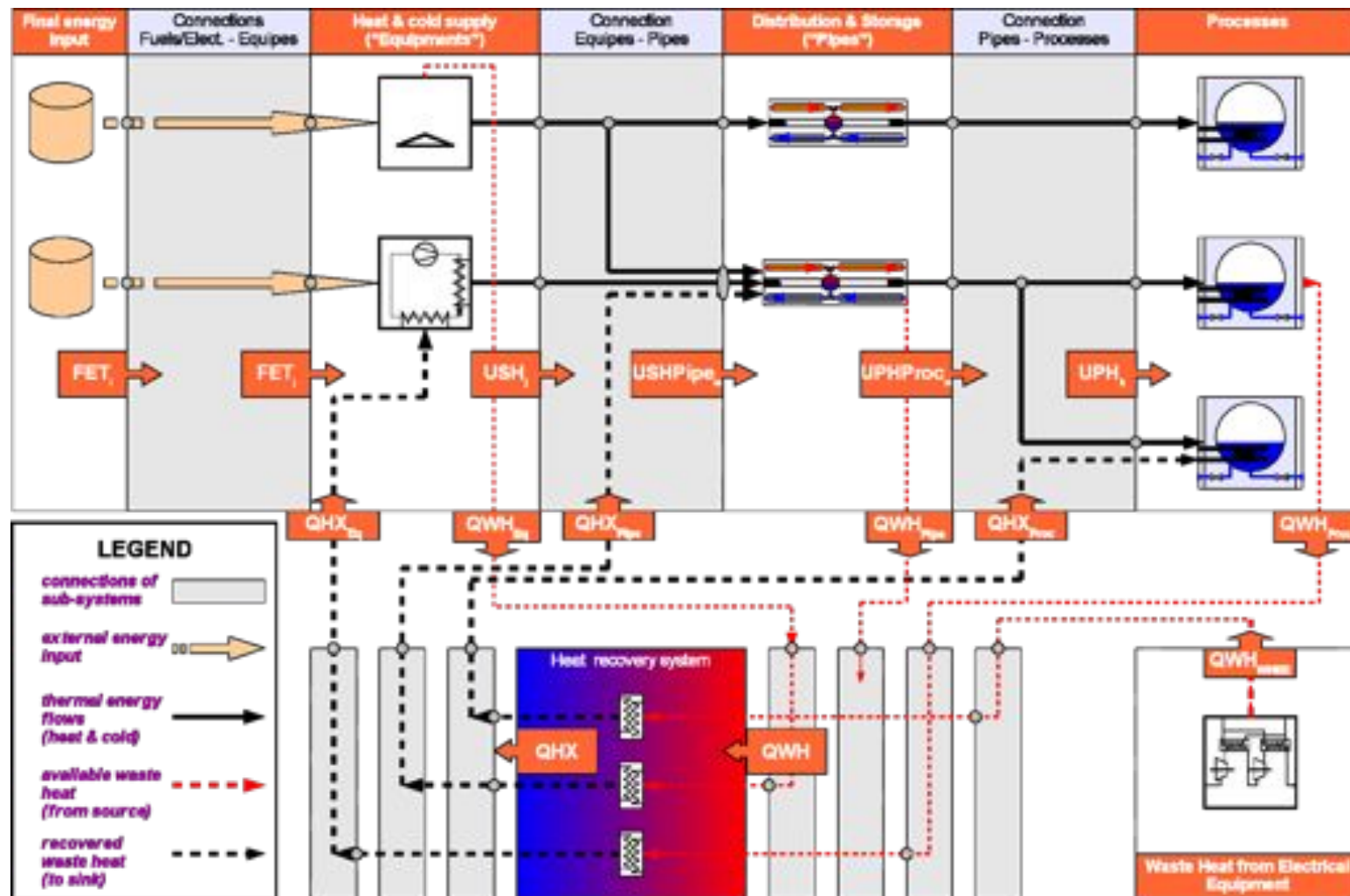


$\Delta T_{min} = 20 \text{ K}$
 $Q_{H,min} = 1000 \text{ kW}$
 $Q_{H,min} = 800 \text{ kW}$
 $T_{pincement} = 180/160^{\circ}\text{C}$



Étapes 7.3 : potentiel théorique de récupération de chaleur

Flux dans EINSTEIN - Flux d'énergie



Étapes 7.3 : potentiel théorique de récupération de chaleur

Les flux enthalpiques suivants seront utilisés dans l'analyse de pincement (liste non exhaustive) :

✓ Processus

- Flux de départ (chauffage au démarrage)
- Flux de circulation (chauffage du support d'arrivée)
- Flux de maintenance (pertes et évaporation)
- Flux de chaleur résiduelle
 - Produits chauds
 - Eau chaude résiduelle
 - Vapeurs
 - Etc.

Étapes 7.3 : potentiel théorique de récupération de chaleur

Les flux enthalpiques suivants seront utilisés dans l'analyse de pincement (liste non exhaustive) :

✓ Lignes de distribution

- Condensations
- Flux de déchets depuis les conduites (air chaud, eau chaude résiduelle,...)
- Préchauffage de l'eau de chaudière
- Etc.

✓ Matériel

- Chaudières
 - À gaz
 - À air de combustion
- Chaleur résiduelle des refroidisseurs
- Demande en chaleur des pompes à chaleur
- Etc.

✓ Matériel électrique

- Chaleur résiduelle des compresseurs électriques

Étapes 7.3 : potentiel théorique de récupération de chaleur

✓ De la fourniture d'énergie et des processus vers les **flux**

✓ Processus = lavage

- Volume de la cuve : 5 m³
- Température de l'eau froide = 10°C
- Température de processus = 60°C
- Entrée d'eau froide = 10 m³/d
- Entrée de chaleur durant le fonctionnement (chauffage de l'eau d'entrée et pertes thermiques, évaporation négligeable) = 90 kW
- Planning de fonctionnement :
 - Démarrage De 6h00 à 6h30
 - Fonctionnement continu De 6h30 à 16h00
- Température de l'eau résiduelle = 50°C
- Température à laquelle l'eau résiduelle peut être refroidie : 5°C.

Étapes 7.3 : potentiel théorique de récupération de chaleur

✓ De la fourniture en énergie et des processus vers les
« flux »

✓ Processus = lavage

→ Flux enthalpiques

Nom	Temp. début	Temp. fin	Débit massique	Chaleur résiduelle / puissance requise	Planning de fonctionnement
	°C	°C	kg/h	kW	
Démarrage	10	60	10.000	582	6h00 – 6h30
Chauffage continu de l'eau entrante	10	60	1.053	61	De 6h30 à 16h00
Entrée d'eau supplémentaire durant le fonctionnement pour les pertes thermiques	60	60	-	29	De 6h30 à 16h00
Eau résiduelle	50	5	1.053	55	De 6h30 à 16h00
Eau résiduelle après l'arrêt de la machine	50	5	10.000	524	16h00 – 16h30

Étape 7.4 : préconception de réseaux d'échangeurs thermiques

✓ Objectif :

- ✓ Intégration de la chaleur par une approche holistique
- ✓ Conception d'un réseau d'échangeurs thermiques

✓ Méthodologie

- ✓ Proposition de conception d'un réseau d'échangeurs thermiques basée sur l'analyse de pincement
- ✓ Simulation d'échangeur thermique

✓ Résultats :

- ✓ Réseau d'échangeur thermique
- ✓ Courbes de la demande en énergie et courbes de disponibilité de l'énergie (demande annuelle en énergie, niveaux de température)

Étape 7.4 : préconception de réseaux d'échangeurs thermiques

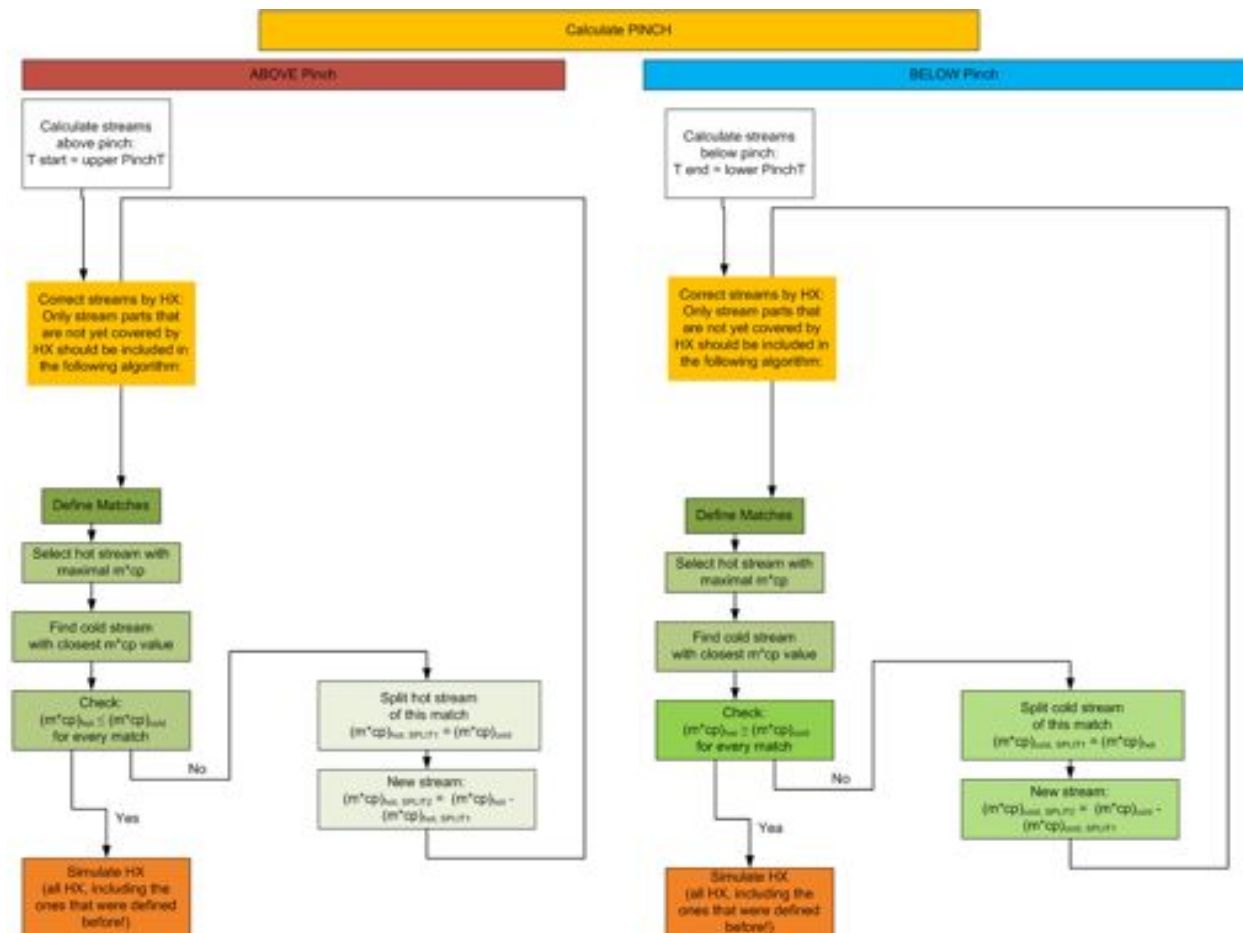
Critères généraux pour un réseau d'échangeur thermique :

- ✓ Utilisation de chaleur à un certain niveau de température pour le chauffage d'autres flux à un niveau de température similaire
- ✓ Puissance du transfert de chaleur
- ✓ Énergie totale transférable sur les échangeurs thermiques
- ✓ L'intégration de la chaleur dans le même processus doit être prioritaire - utilisation directe de la chaleur résiduelle
- ✓ L'utilisation de la chaleur qui doit être refroidie par une machine de refroidissement pour les processus de chauffage augmente les économies d'énergie par le transfert de chaleur, la fourniture d'énergie externe de la source de chaleur pouvant être économisée
- ✓ Distance entre la source de chaleur (flux chaud) et la source froide (flux froid)
- ✓ Problèmes pratiques, comme les facteurs d'encrassement, la nécessité d'un transfert de chaleur indirect par un support de transfert de chaleur, les aspects de la température et de la pression, etc.
- ✓ Coûts d'investissement et coûts de l'énergie économisée

Étape 7.4 : préconception de réseaux d'échangeurs thermiques

Algorithme de sélection de l'échangeur thermique d'EINSTEIN

Sur la base de l'algorithme de pincement (Kemp et al., 2007):



Étape 7.4 : préconception de réseaux d'échangeurs thermiques

Simulation d'échangeur thermique dans

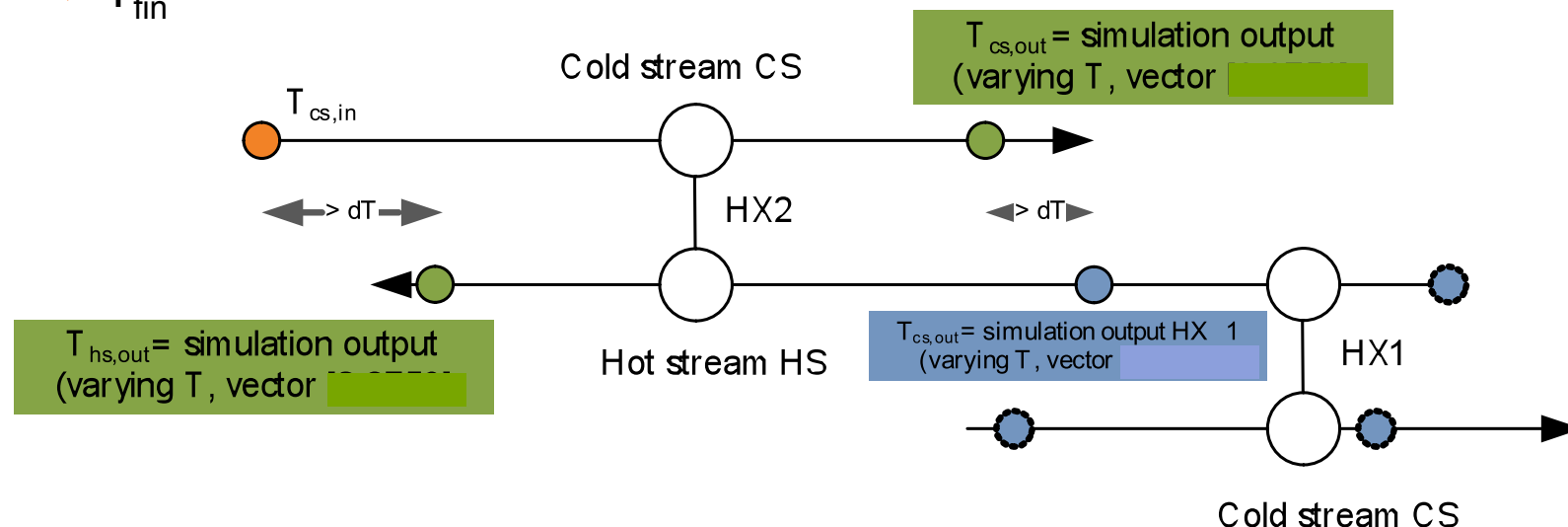
EINSTEIN :

✓ Valeurs de départ pour les sources :

- ✓ Q_t
- ✓ $T_{\text{début}}$
- ✓ T_{fin}

✓ Résultats de la simulation

- ✓ Q_{HX_t}
- ✓ $T_{\text{arrivée}_t}$
- ✓ T_{sortie_t}



Étape 7.4 : préconception de réseaux d'échangeurs thermiques

Simulation d'échangeur thermique dans
EINSTEIN :

✓ Équations de base :

$$Q = m_{cs} * cp_{cs} * \Delta T_{cs} = m_{hs} * cp_{hs} * \Delta T_{hs}$$

$$\frac{\Delta T_{cs}}{\Delta T_{hs}} = \frac{m_{hs} * cp_{hs}}{m_{cs} * cp_{cs}}$$

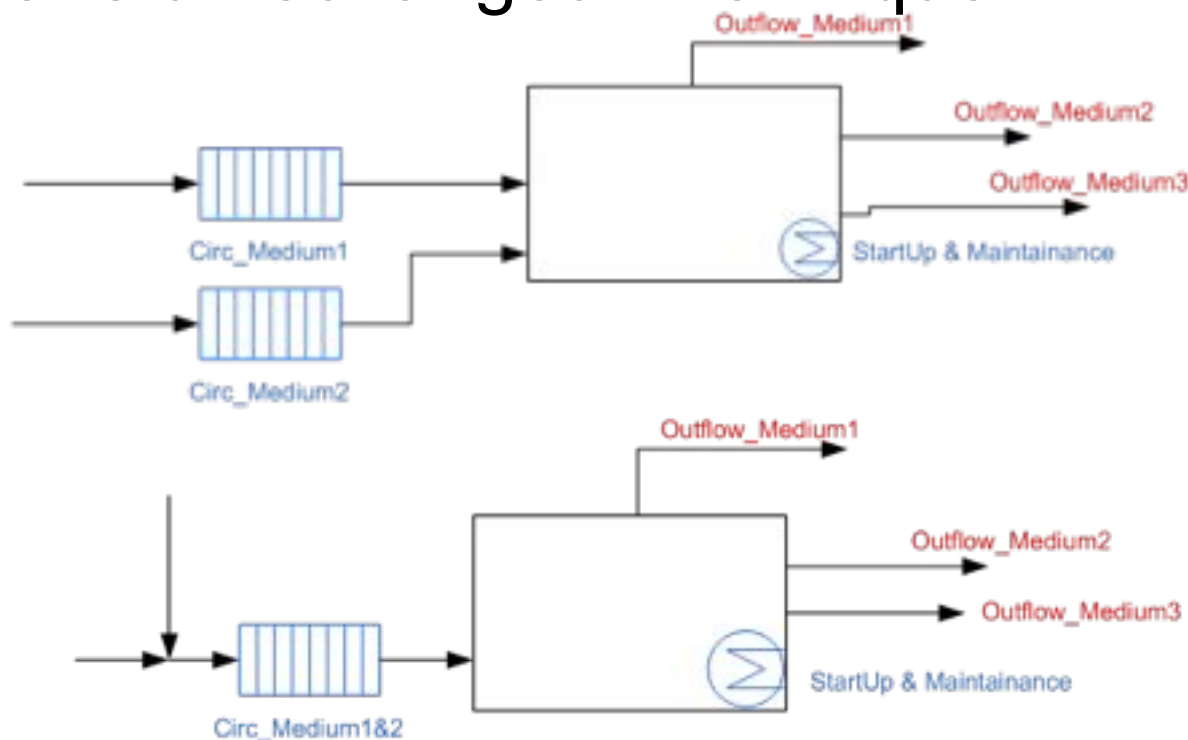
$$Q = U * A * \Delta T_{\log,hx}$$

$$\Delta T_{\log,hx} = \frac{(T_{hs,in} - T_{cs,out}) - (T_{hs,out} - T_{cs,in})}{\ln\left(\frac{T_{hs,in} - T_{cs,out}}{T_{hs,out} - T_{cs,in}}\right)}$$

Étape 7.4 : préconception de réseaux d'échangeurs thermiques

Simulation d'échangeur thermique dans
EINSTEIN :

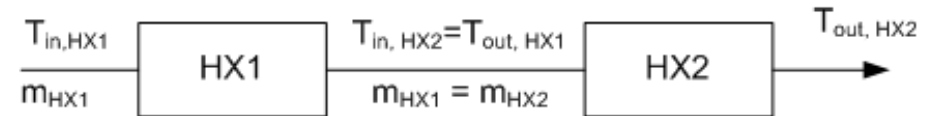
- ✓ Plusieurs sources peuvent être combinées dans un échangeur thermique :



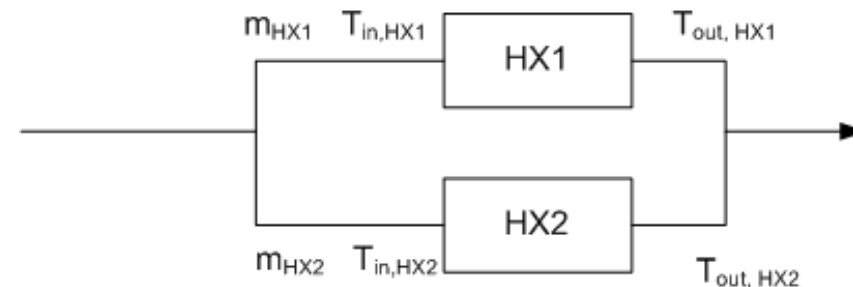
Étape 7.4 : préconception de réseaux d'échangeurs thermiques

Interconnexions d'échangeurs thermiques possibles :

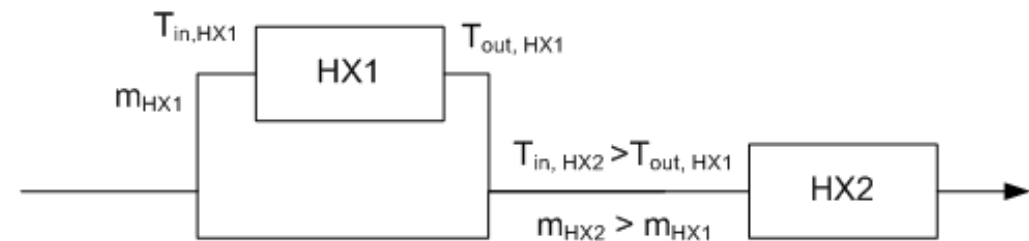
✓ Interconnexion en série



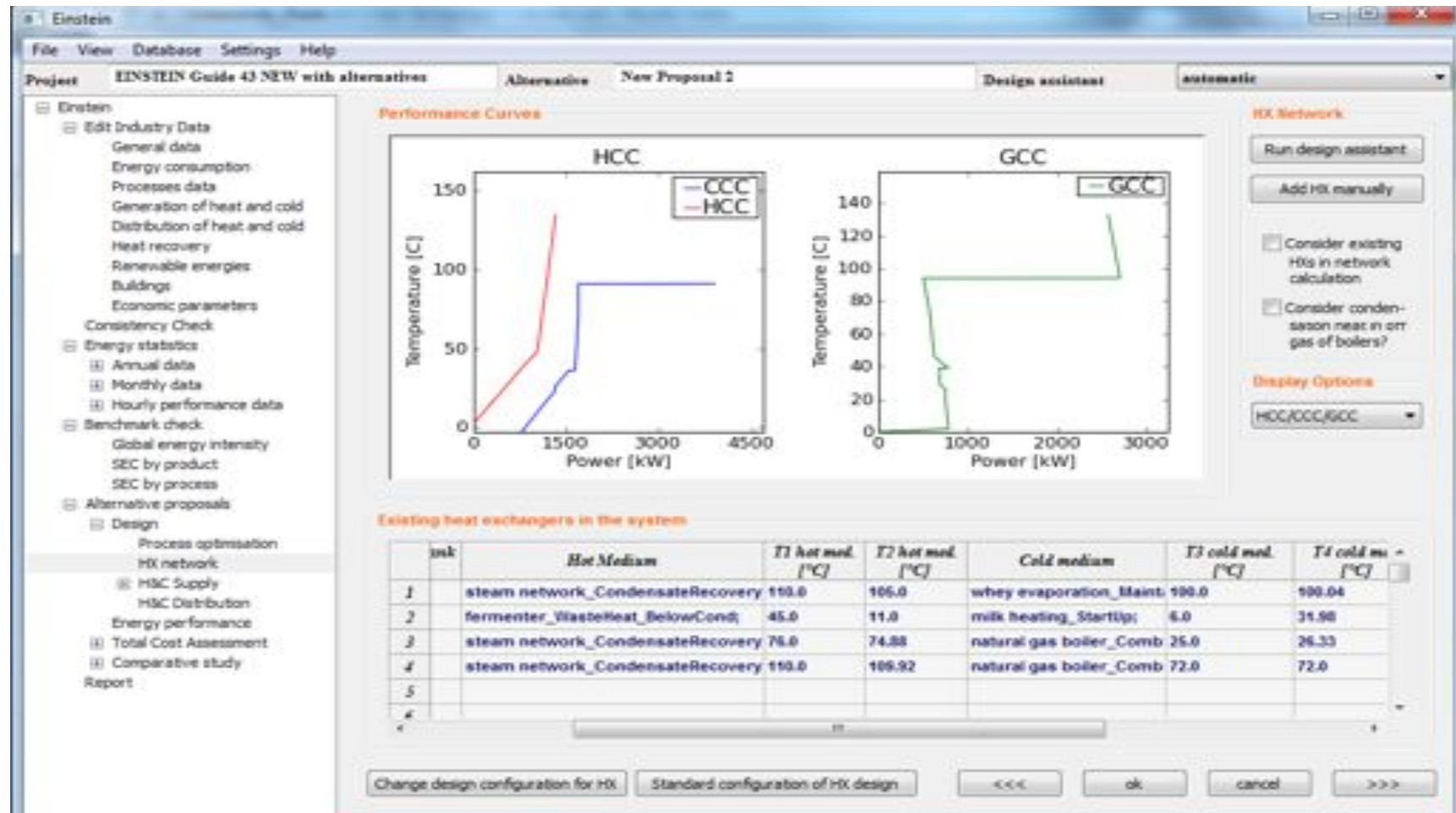
✓ Interconnexion parallèle



✓ Interconnexion en série avec dérivation



Étape 7.4 : préconception de réseaux d'échangeurs thermiques



Courbe composite du chaud et du froid, courbe composée globale et réseau de l'échangeur thermique proposé

Étape 7.4 : préconception de réseaux d'échangeurs thermiques

Valeurs standards pour ΔT_{\min} et le coefficient de transfert de chaleur α :

Physical state	ΔT_{\min} [°C]	Heat transfer coefficient α [W/m ² K]
Liquid	5	5.000
Gaseous	10	100
condensation	2,5	10.000

Types d'échangeur thermique et coefficients généraux de transfert de chaleur:

Heat exchange	Heat exchanger type chosen in EINSTEIN	Overall Heat transfer coefficient (material = stainless steel) α [W/m ² K]	Average values given in VDI Heat Compendia [W/m ² K]
Liquid - Liquid	Plate heat exchanger	2.143	1000 – 4000
Gaseous – liquid	Shell&tube	97	15-70
Condensation – liquid	Shell&tube	2724	500 – 4000
Gaseous – gaseous	Shell&tube	50	5-35
Condensation – gaseous	Shell&tube	99	20 - 60