

Un logiciel pédagogique pour la formation des ingénieurs : Thermoptim

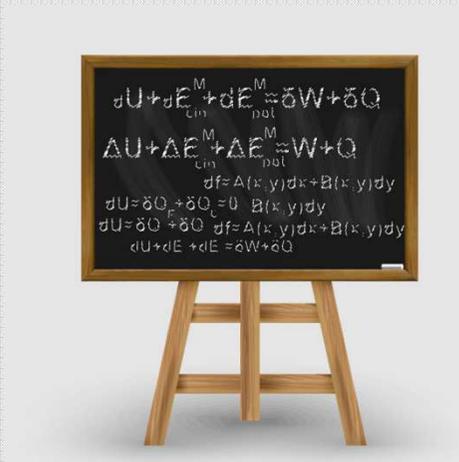
R. Gicquel

Séminaire SFT – SFGP
Fluides de travail pour la
production de froid

15/03/2017

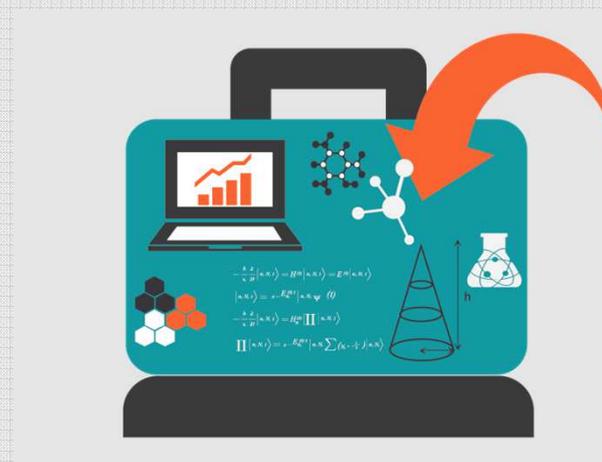
★ UN NOUVEAU DÉFI

➤ problèmes plus complexes



© Freepik

➤ bagage scientifique plus léger



© Freepik

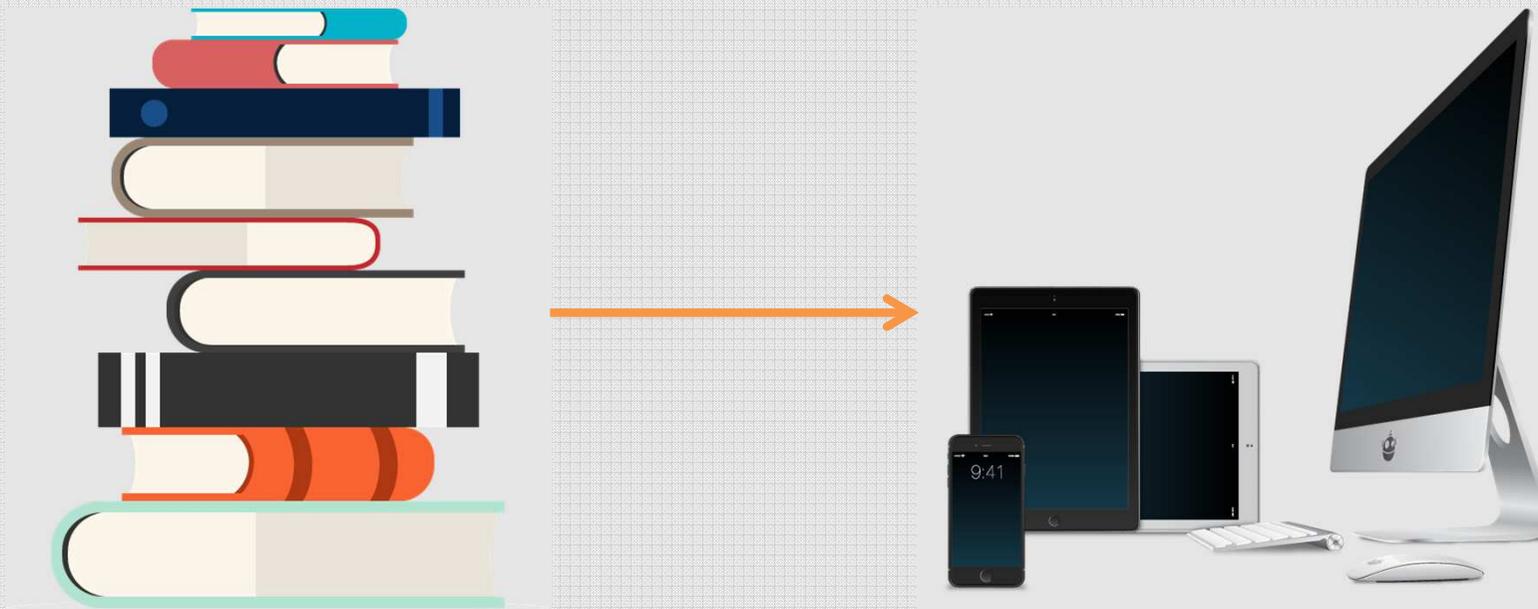
➤ volume horaire réduit



© Freepik

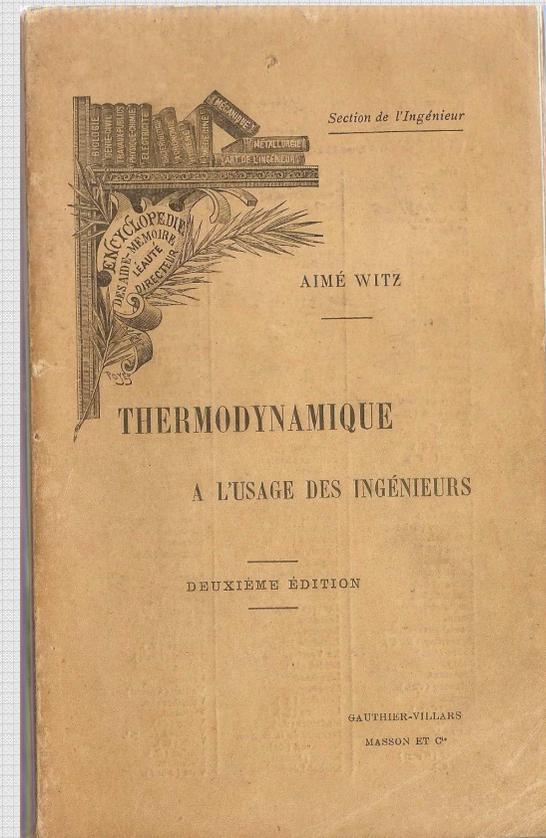
★ DE NOUVEAUX OUTILS

- utilisation pédagogique des TICE et des simulateurs
 - change non seulement la forme
 - mais aussi le fond (contenu de l'enseignement)
- illustration : thermodynamique appliquée à l'énergétique



★ THERMODYNAMIQUE APPLIQUÉE

- modèles enseignés issus des approches classiques :
 - soit irréalistes
 - soit incalculables à la main
- démotivation des étudiants :
 - hypothèses de calcul trop simplistes → modèles sans intérêt pratique
 - calculs précis fastidieux → discipline rebutante

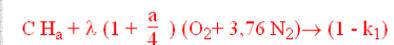


★ MOTEURS À COMBUSTION INTERNE

- considérés comme traversés par de l'air supposé être un gaz parfait
- un moteur à air n'a jamais pollué et ne polluera jamais



Combustion



$$+ \left((\lambda - 1) \left(1 + \frac{a}{4}\right) + \frac{k_1}{2} + k_2 \frac{a}{4}\right)$$

$$g(k) = - \frac{K_p (1 - k)}{k + K_p (1 - k)} \frac{a}{4}$$

$$(1) \quad [CO_2] = \frac{1 - k}{\Sigma}$$

$$(2) \quad [CO] = \frac{k}{\Sigma}$$

..... a.

Détente

$$\beta_3 = \frac{\gamma_3 - 1}{\gamma_3} = \frac{c_{p3} - c_{v3}}{c_{p3}}$$

$$\theta = \frac{T_3}{T_1}$$

$$h_3 - h_4 = c_{p3} T_3 (1 - r^{-\beta_3}) = c_{p3} T_1 \theta (1 - r^{-\beta_3})$$

$$h_3 - h_4' = \eta_t (h_3 - h_4)$$

Compression

$$\beta_1 = \frac{\gamma_1 - 1}{\gamma_1} = \frac{c_{p1} - c_{v1}}{c_{p1}}$$

$$r = \frac{P_2}{P_1}$$

$$h_2 - h_1 = c_{p1} T_1 (r^{\beta_1} - 1)$$

$$h_2' - h_1 = \frac{h_2 - h_1}{\eta_c}$$

★ MESSAGE SUBLIMINAL

- enseignement à la fois très rébarbatif et totalement inapplicable
- ne vous servira à rien dans votre vie professionnelle:
- ce qui intéresse les élèves : s'attaquer aux défis actuels de l'énergétique
 - réduction de l'impact environnemental des technologies
 - amélioration des rendements



✦ THERMOPTIM

- conception d'un simulateur, étant donné qu'il n'en existait pas à l'époque
- cheminement suivi
 - années 1990-1995 : nombreuses feuilles de calcul pour résoudre les équations présentées aux élèves
 - limites :
 - ils ne maîtrisaient pas bien les tableurs à cette époque
 - difficulté à se souvenir du détail des formules saisies dans les différentes cellules quand le nombre de feuilles de calcul augmente
- tableurs :
 - potentiel considérable
 - mais lisibilité du code très réduite, et maintenance difficile

CENTRALE À VAPEUR / CYCLE ORC

Travail de compression τ_p

$$\tau_p = h_2 - h_1$$

$$\tau_p = v \Delta p = \int v dp = v \int dp = v (P_2 - P_1)$$

$$\tau_p = 10^{-3} (165 - 0,023) 10^5 = 16,5 \text{ kJ/kg}$$

Chaudière

$$Q_{ch} = h_3 - h_2$$

$$h_2 = h_1 + \tau_p$$

$$Q_{ch} = h_3(T_3, P_3) - h_1(T_1, P_1) - \tau_p$$

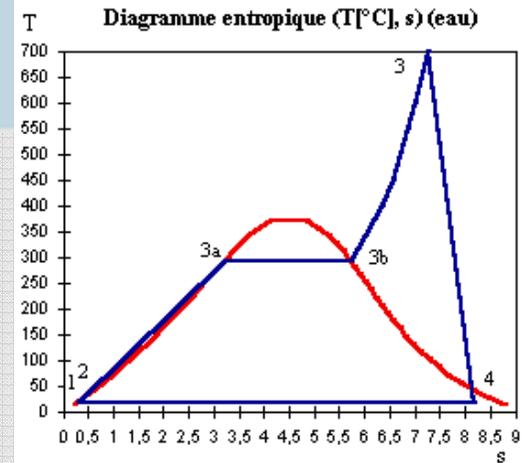
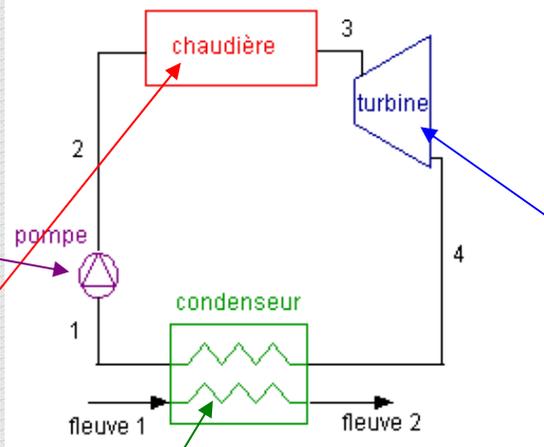
$h_3 - h_1$ par interpolation dans les tables :

$$Q_{ch} = 3460 - 100 = 3360 \text{ kJ/kg}$$

Condenseur

$$Q_c = h_4' - h_1 = 2133 - 83 = 2050 \text{ kJ/kg}$$

Schéma d'une centrale à vapeur



Détente

$$\tau_s = h_3(T_3, P_3) - h_4(s_3, P_4)$$

par interpolation dans les tables :

$$\tau_s = 3460 - 1900 = 1560 \text{ kJ/kg}$$

$$\tau_t = h_3 - h_4' = \eta_t \tau_s$$

$$h_4' = 2134 \text{ kJ/kg}$$

par inversion des tables :

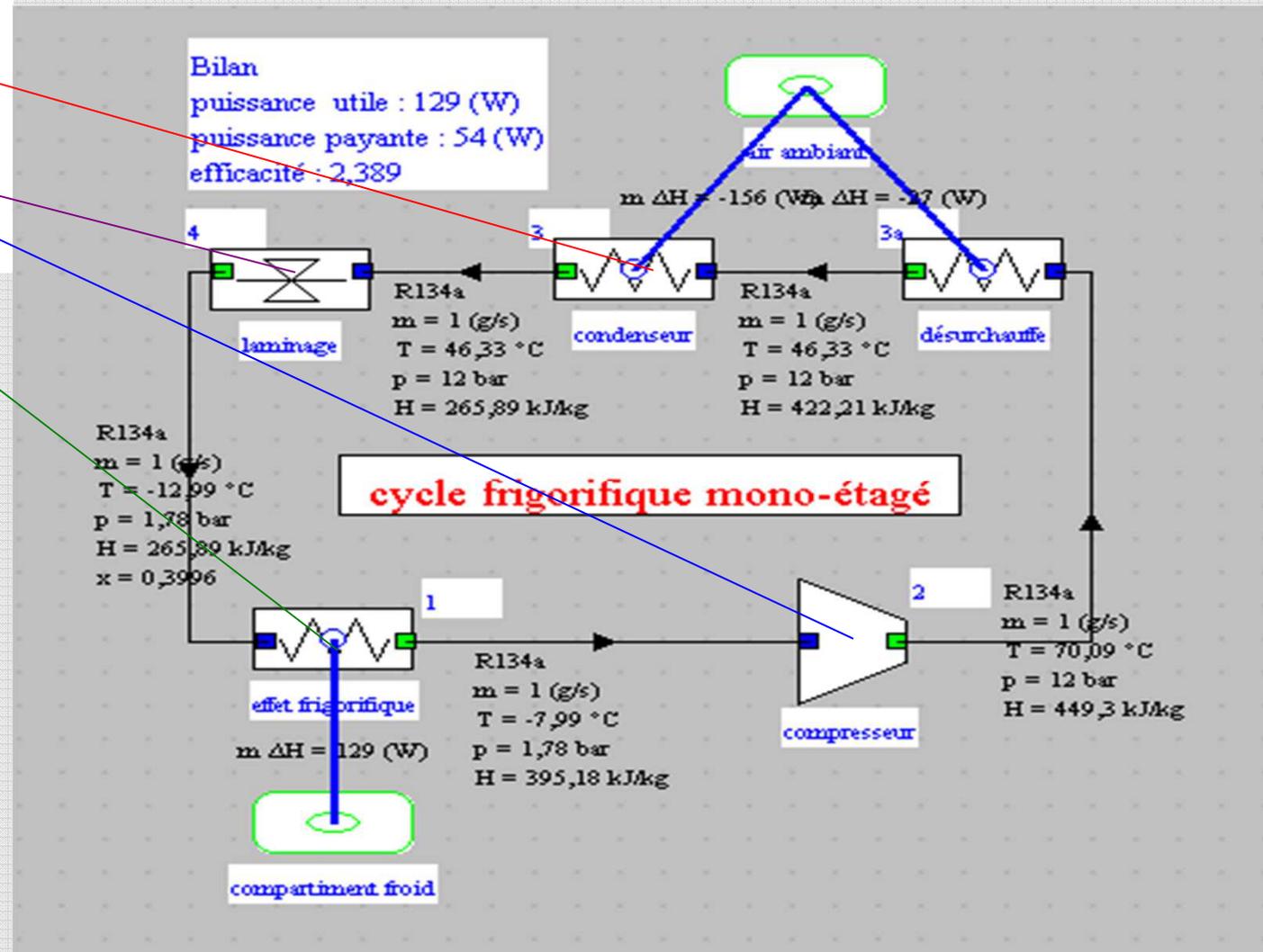
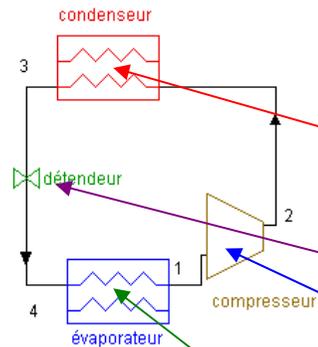
$$x_4'(h_4', P_4) = 0,854$$

Tables de la vapeur d'eau

P, MPa (T _{sat} , K)	750	800	850
0.0010 (280.1)	v, m ³ /kg 346.1	369.2	392.3
	h, kJ/kg 3439.6	3546.1	3654.3
	s, kJ/(kg·K) 10.8952	11.0327	11.1639
	u, kJ/kg 3093.5	3176.9	3262.0
0.0020 (290.7)	v, m ³ /kg 173.1	184.6	196.1
	h, kJ/kg 3439.6	3546.1	3654.3
	s, kJ/(kg·K) 10.5753	10.7128	10.8440
	u, kJ/kg 3093.5	3176.9	3262.0
0.0040 (302.1)	v, m ³ /kg 86.53	92.30	98.07
	h, kJ/kg 3439.6	3546.1	3654.3
	s, kJ/(kg·K) 10.2554	10.3929	10.5241
	u, kJ/kg 3093.4	3176.9	3262.0
0.0070 (312.2)	v, m ³ /kg 49.45	52.74	56.04
	h, kJ/kg 3439.5	3546.0	3654.3
	s, kJ/(kg·K) 9.9971	10.1346	10.2658
	u, kJ/kg 3093.4	3176.9	3262.0
0.010 (319.0)	v, m ³ /kg 34.61	36.92	39.23
	h, kJ/kg 3439.5	3546.0	3654.3
	s, kJ/(kg·K) 9.8324	9.9699	10.1011
	u, kJ/kg 3093.4	3176.8	3262.0

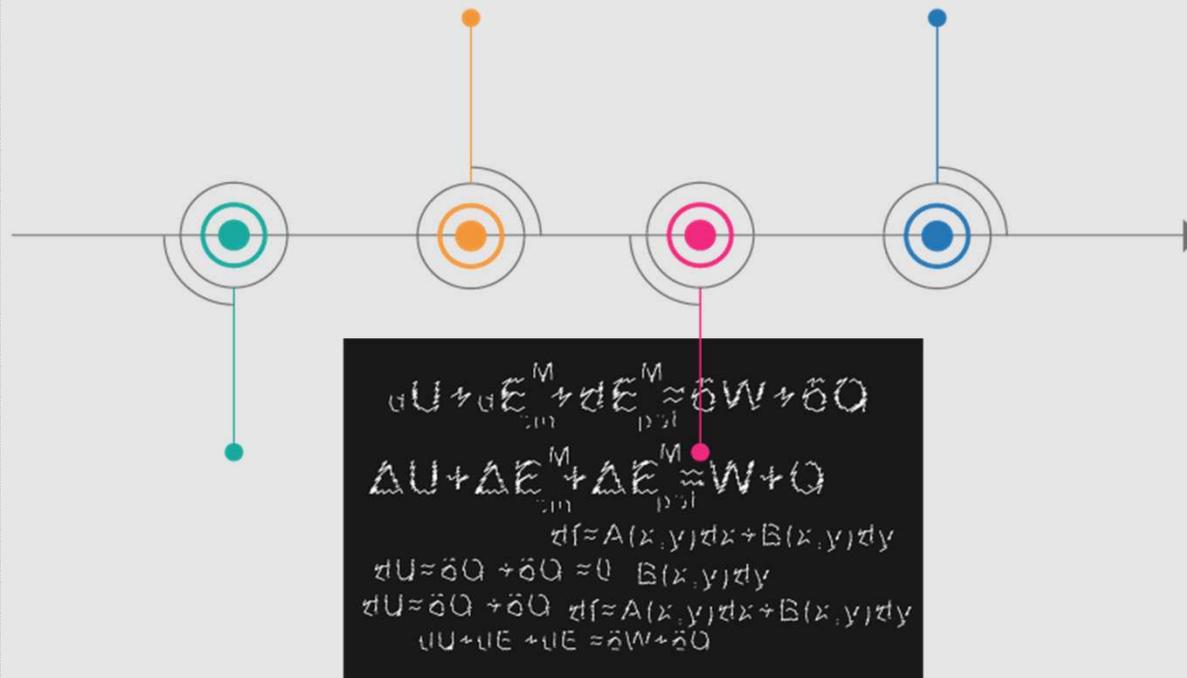
INSTALLATION DE REFRIGERATION

Schéma d'un cycle frigorifique à compression



★ DÉPLACEMENT DE LA PROBLÉMATIQUE PÉDAGOGIQUE

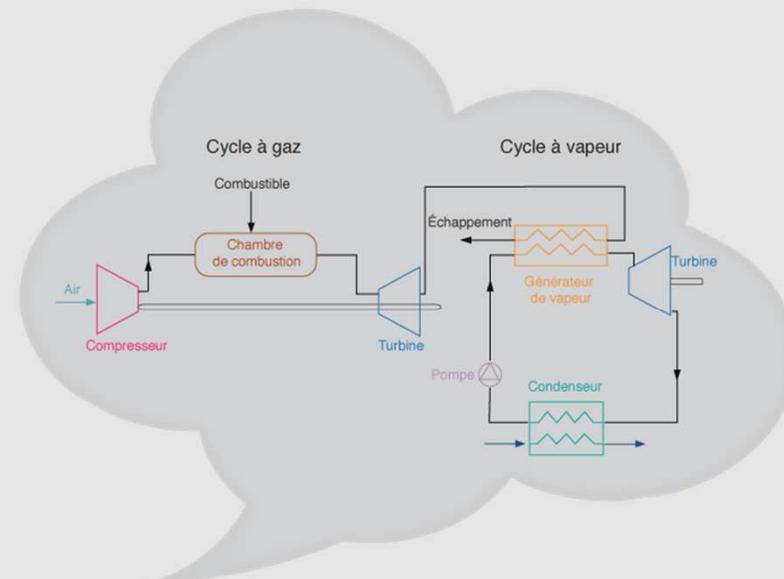
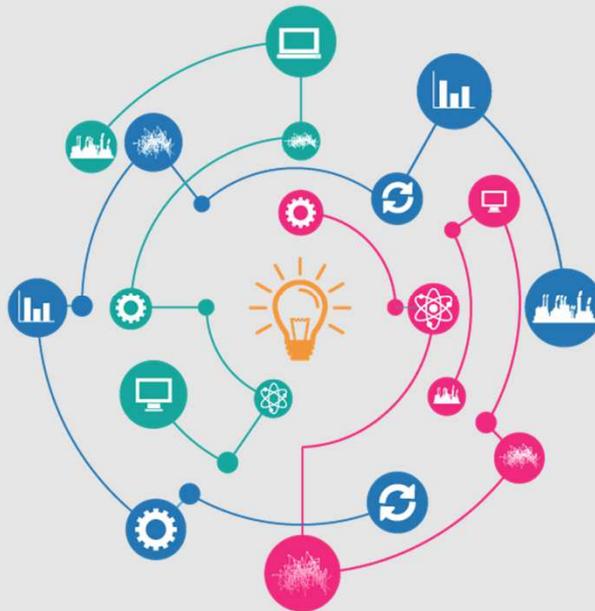
- contenu à enseigner très vite remis en cause
- enseignement des évolutions théoriques drastiquement réduit



★ DÉPLACEMENT DE LA PROBLÉMATIQUE PÉDAGOGIQUE

➤ consacrer du temps :

- à l'apprentissage des technologies
- à la réflexion sur les architectures des cycles



★ DÉPLACEMENT DE LA PROBLÉMATIQUE PÉDAGOGIQUE

- Question centrale : que faut-il enseigner ?
- Distinction savoir-savoir-faire insuffisante



✦ MODÈLE RTM(E)

Savoir 

Réalité : nature, technologie, faits observés, matière, terrain

Théorie :

- ✦ schéma explicatif mettant en évidence les ressemblances entre les différentes observations de la Réalité
- ✦ les expliquant de manière à la fois cohérente et aussi simple et générique que possible

✦ MODÈLE RTM(E)

Savoir 

Réalité : nature, technologie, faits observés, matière, terrain

Théorie :

- ✦ schéma explicatif mettant en évidence les ressemblances entre les différentes observations de la Réalité
- ✦ les expliquant de manière à la fois cohérente et aussi simple et générique que possible

Savoir-faire 

Méthodes : outils opérationnels de résolutions de problèmes

★ MODÈLE RTM(E)

Savoir 

Réalité : nature, technologie, faits observés, matière, terrain

Théorie :

- ★ schéma explicatif mettant en évidence les ressemblances entre les différentes observations de la Réalité
- ★ les expliquant de manière à la fois cohérente et aussi simple et générique que possible

Savoir-faire 

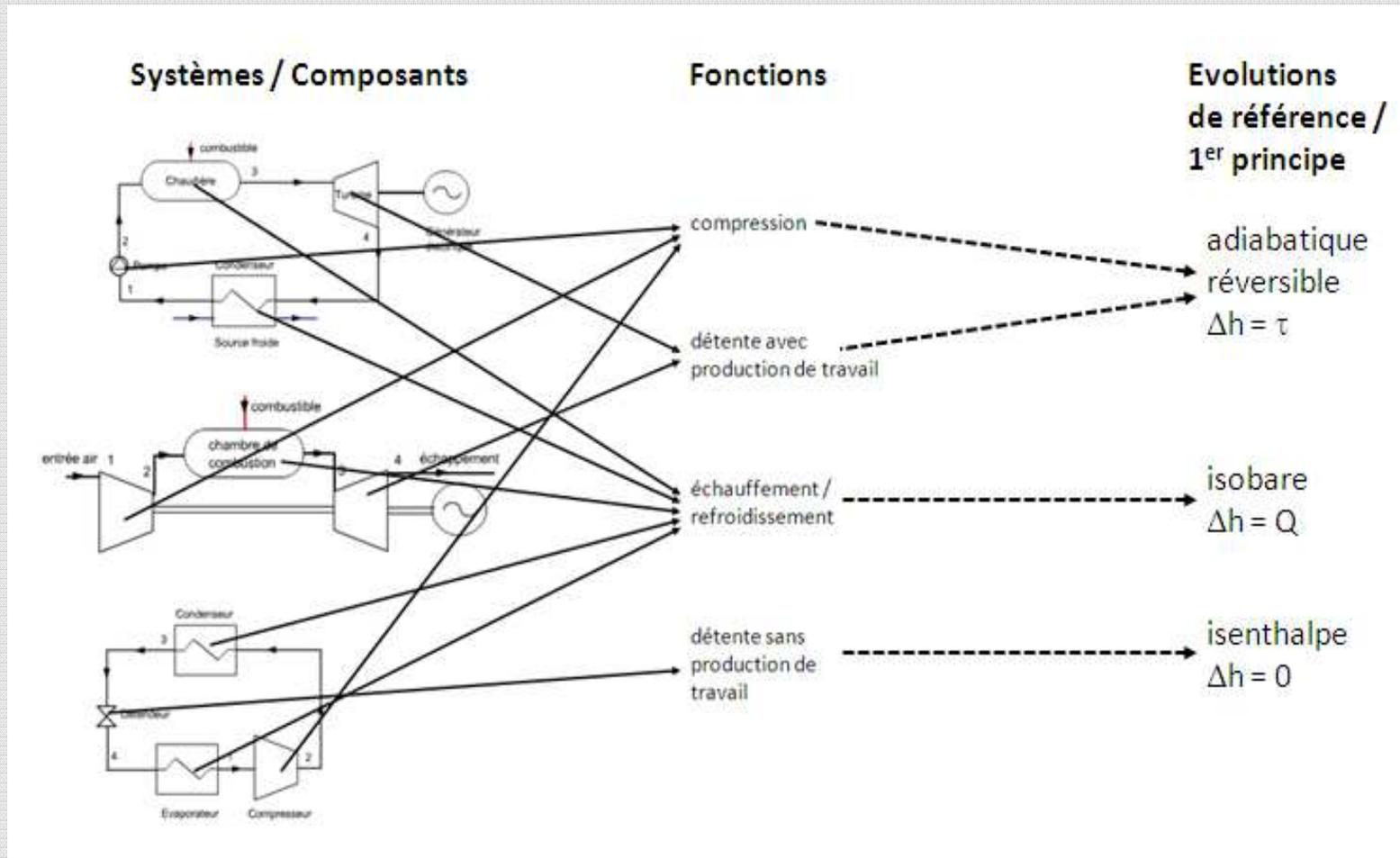
Méthodes : outils opérationnels de résolutions de problèmes

Exemples : illustrent comment résoudre (grâce aux **Méthodes** et dans le cadre d'une **Théorie**) une classe de problèmes relative à un aspect particulier (de la **Réalité**)

★ Comment séquencer les différentes notions à présenter

- apprenants en formation initiale : habitués au découpage disciplinaire, mais pas toujours très motivés
- apprenants en formation professionnelle : veulent voir le lien à l'emploi, savoir à quoi correspond ce qui leur est présenté, mais désireux d'apprendre
- logique cartésienne (souvent inadaptée) :
 - 1) rappels de mathématiques et de physique
 - 2) théorie
 - 3) pratique

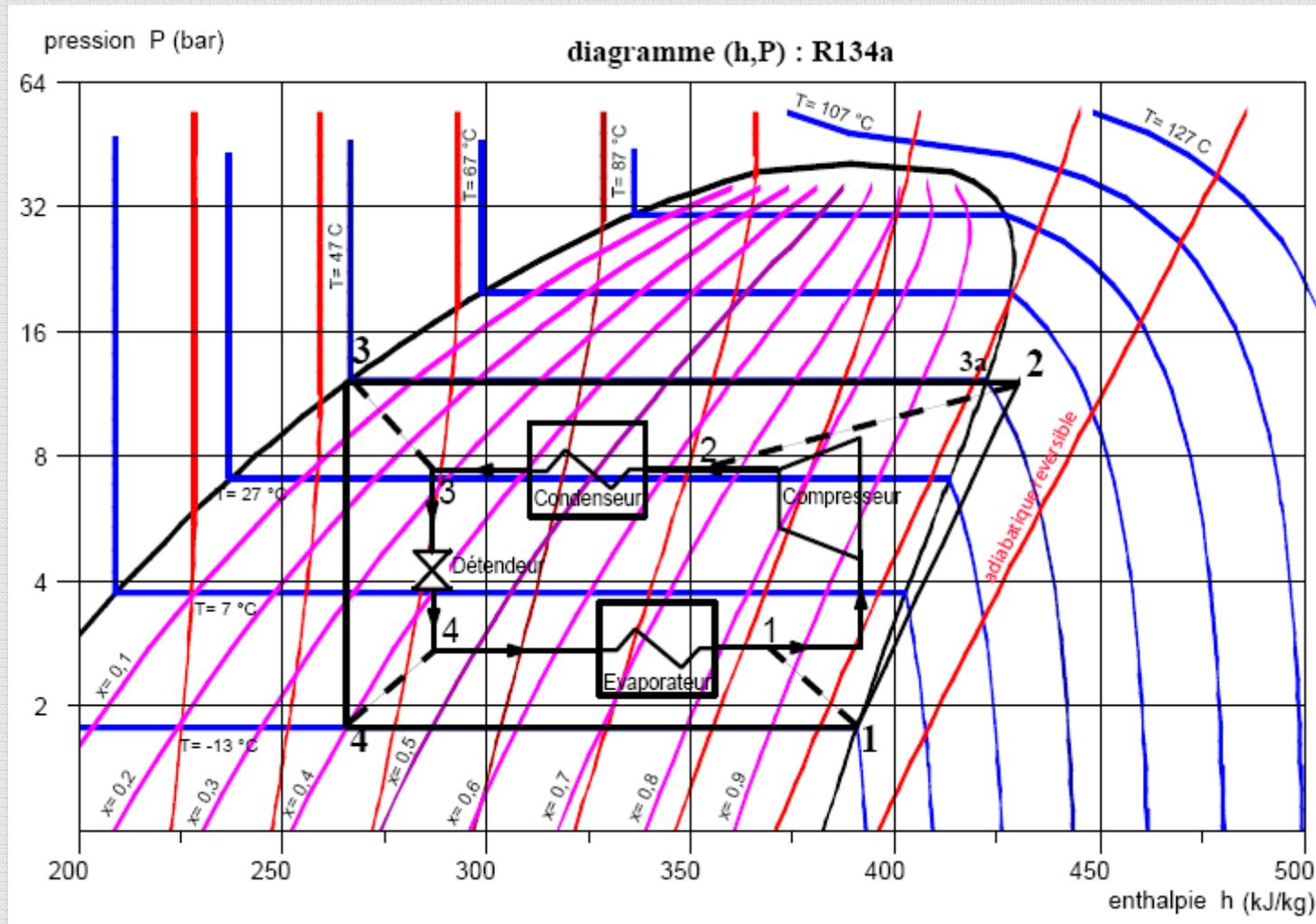
- ✦ Systèmes techniques, composants, fonctions et évolutions de référence



✦ Évolutions de référence : notion fondamentale

- on introduit les modèles de comportement des **fluides** dans les machines
- on est conduit à se pencher sur leurs propriétés :
 - Réalité (étude de la matière)
 - Théorie (pour leur représentation)
- on aboutit entre autres aux **diagrammes thermodynamiques** dans lesquels les cycles peuvent être visualisés (Méthodes)
 - constituent un des environnements de travail du simulateur
 - jouent un rôle fondamental dans l'apprentissage

✦ Diagrammes thermodynamiques



✦ Simulateur

- les composants mis en œuvre correspondent aux **fonctions** identifiées
- cycles construits en connectant ces composants dans l'éditeur graphique
- paramétrage effectué par comparaison aux évolutions de référence

★ Club Aides Logicielles Enseignement Thermodynamique, stages LIESSE

- besoins en développements complémentaires
- intérêt pour des discussions plus approfondies :
 - partage et confrontation des expériences
 - aspects pédagogiques



✦ www.thermoptim.org

La Thermodynamique appliquée aux systèmes énergétiques

MINES ParisTech

PSL RESEARCH UNIVERSITY PARIS

Fondation unit Université Sorbonne Ingénierie et Technologie

Bases de thermodynamique Guides méthodologiques Technologies Problèmes globaux Enseignement Logiciel Glossaire

Dernières nouvelles

- Activités d'auto-évaluation
- « Problèmes Énergétiques Globaux », un MOOC essentiel dans le contexte énergétique et pétrolier actuel
- Explorateur de scénarios pédagogiques pour Thermoptim
- Thermoptim sous Java 2

RSS

Vous êtes étudiant ?
Démarrage, FAQ, Cartes mentales
Modules d'auto-formation (accès libre)
Séances Diapason disponibles

Enseignant ?
Découverte, Communauté UNIT
Club ALET
Ressources disponibles

Autre ?
Simple visiteur, Industriel
Documentation disponible

Bienvenue sur le portail Thermoptim-UNIT !

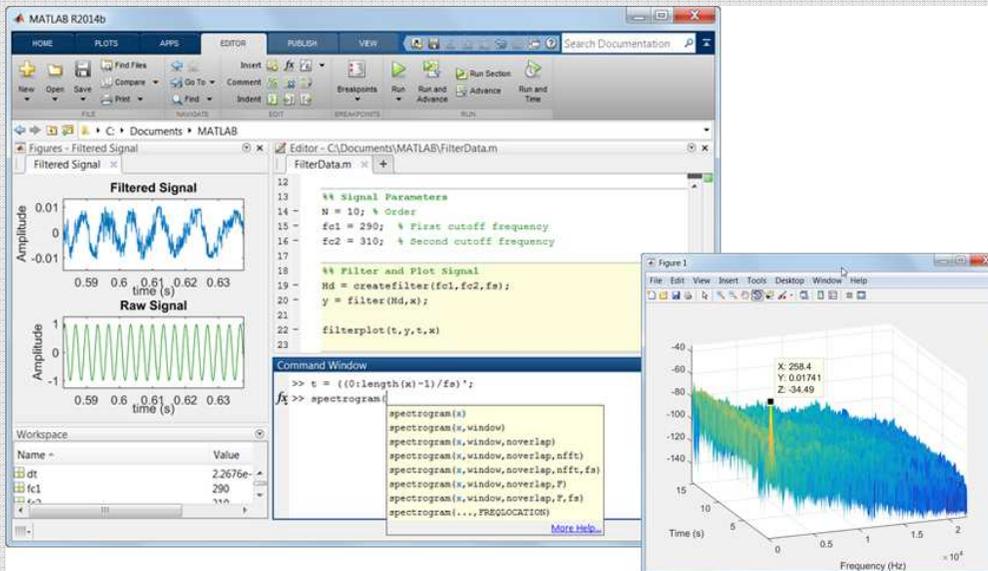
Le projet **THERMOPTIM** traduit la volonté d'**aborder différemment la thermodynamique appliquée aux systèmes énergétiques** grâce aux Nouvelles Technologies Educatives (NTE). Il ouvre la voie à une **nouvelle approche pédagogique** qui permet de dépasser les difficultés auxquelles est confronté l'enseignement classique de cette discipline et de former des ingénieurs et scientifiques capables d'affronter les défis énergétiques du futur.

Il forme aujourd'hui un **ensemble large et cohérent de ressources** mises à votre disposition dans ce portail, dont nous espérons que ses **fonctionnalités** répondront à vos attentes. Notre objectif est qu'il constitue un outil de travail de qualité pour le plus grand nombre. N'hésitez surtout pas à nous faire part de vos remarques et suggestions.

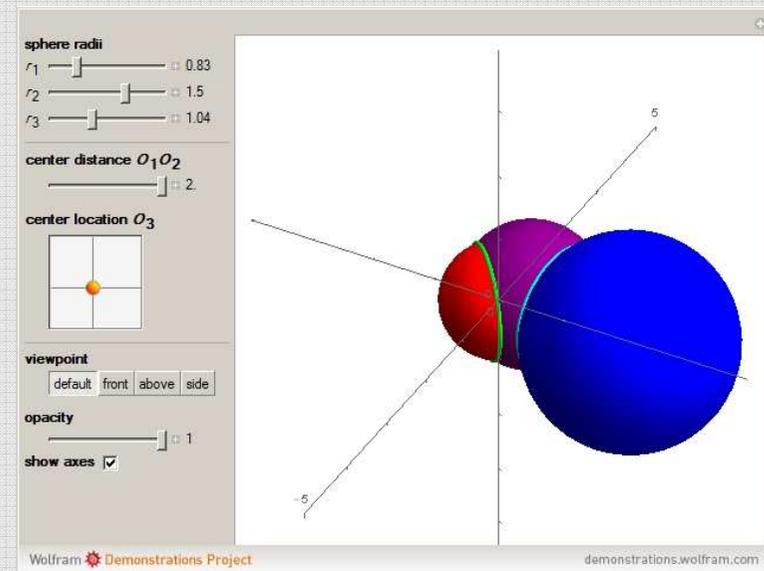
✦ DÉMARCHES ANALOGUES

- électronique
- génie électrique
- mécanique des fluides
- génie des procédés
- mathématiques (Mathematica)
- automatique (Matlab)

Matlab



Mathematica



✦ L'ENVERS DU DÉCOR

- risque que les savoirs sous-jacents au simulateur ne soient pas bien maîtrisés
- conclusions erronées si la formation n'est pas vigilante
- dans l'avenir, pourrions-nous conserver ou recréer ces savoirs non enseignés ?



✦ DEUX APPROCHES PEDAGOGIQUES

- Explorations dirigées de modèles pré-construits (MOOC CTC)
- Construction de modèles par les élèves eux-mêmes (usage habituel)

✦ GRANDE VARIETE

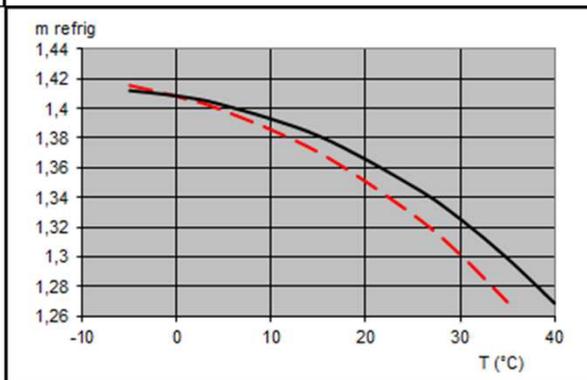
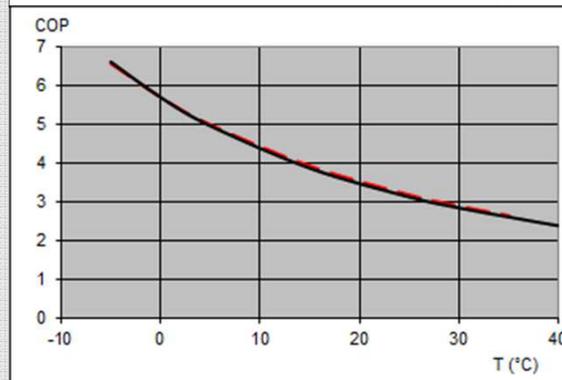
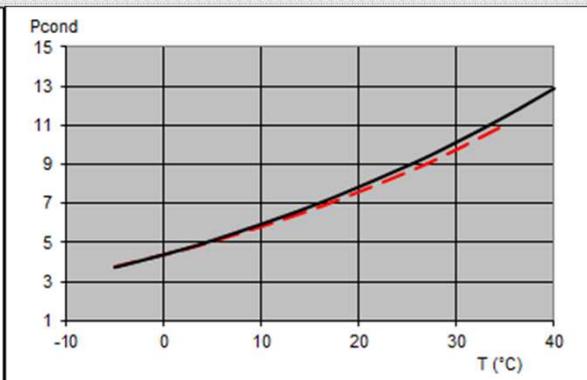
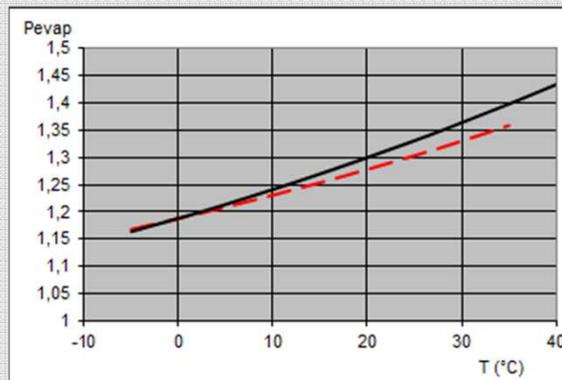
- Base de données des propriétés thermodynamiques des fluides les plus couramment rencontrés en pratique
- Thermoptim peut être couplé à des serveurs de propriétés thermodynamiques pour représenter des fluides particuliers

✦ BIBLIOTHÈQUE CTP LIB

- développée sous Java en partenariat avec Christophe (CTP) pour représenter des mélanges de fluides représentés par des cubiques
- + certains systèmes particuliers utilisés en réfrigération :
 - mélange (LiBr, H₂O)
 - mélange (NH₃, H₂O) (modèle de Ziegler et Trepp)
 - CO₂ (modèle de Span et Wagner)
 - modèles PCSaft et CPA

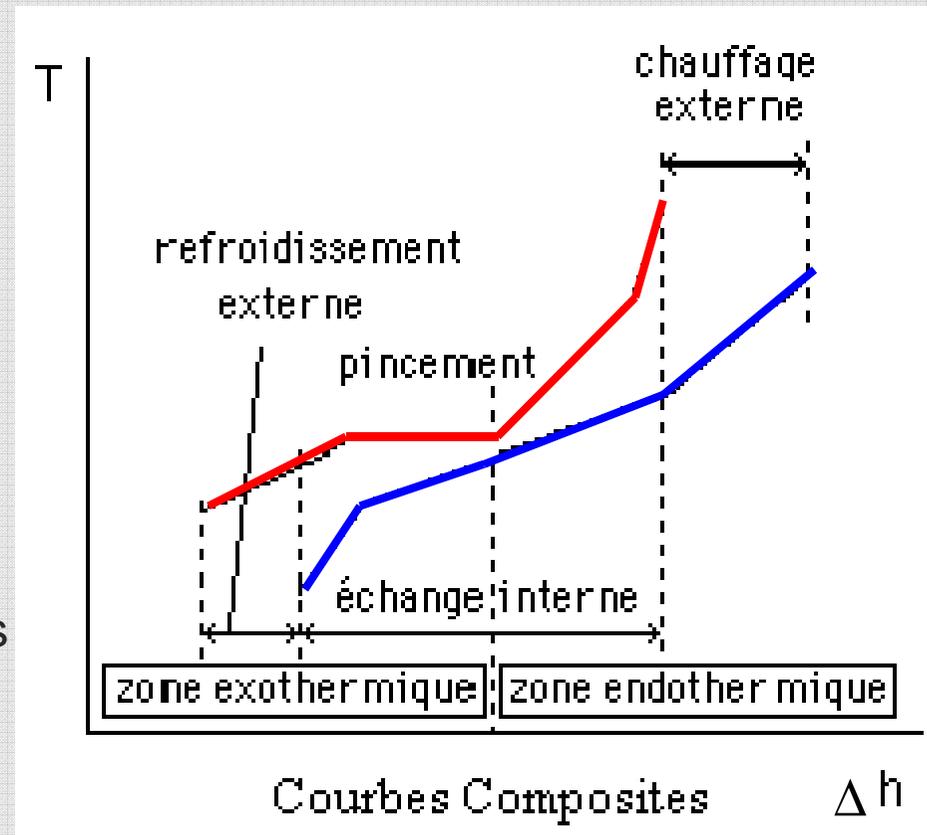
★ ADAPTATION DE LA MACHINE AUX SOLLICITATIONS EXTERIEURES

- températures résultent de l'équilibre thermique des échangeurs
- débit et rendement isentropique dépendent de la caractéristique du compresseur



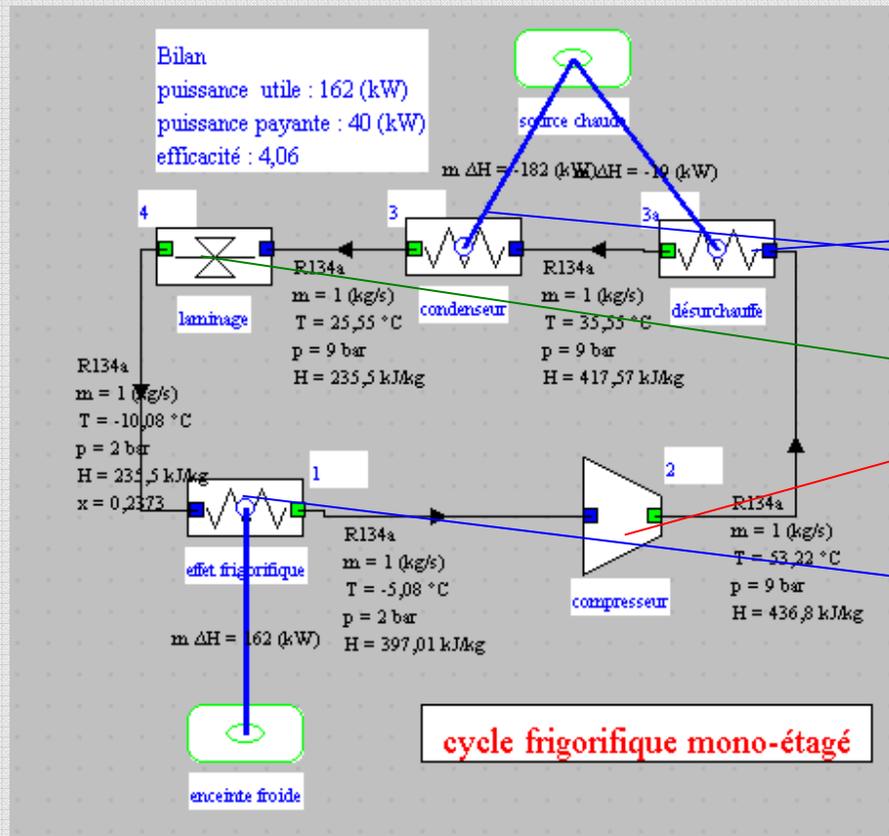
★ COURBES COMPOSITES

- zone inférieure : excédent à évacuer
- zone supérieure : besoin d'appoint
- si pincement nul, zones indépendantes
- sinon, Q_p transite et doit être fourni et évacué en excédent



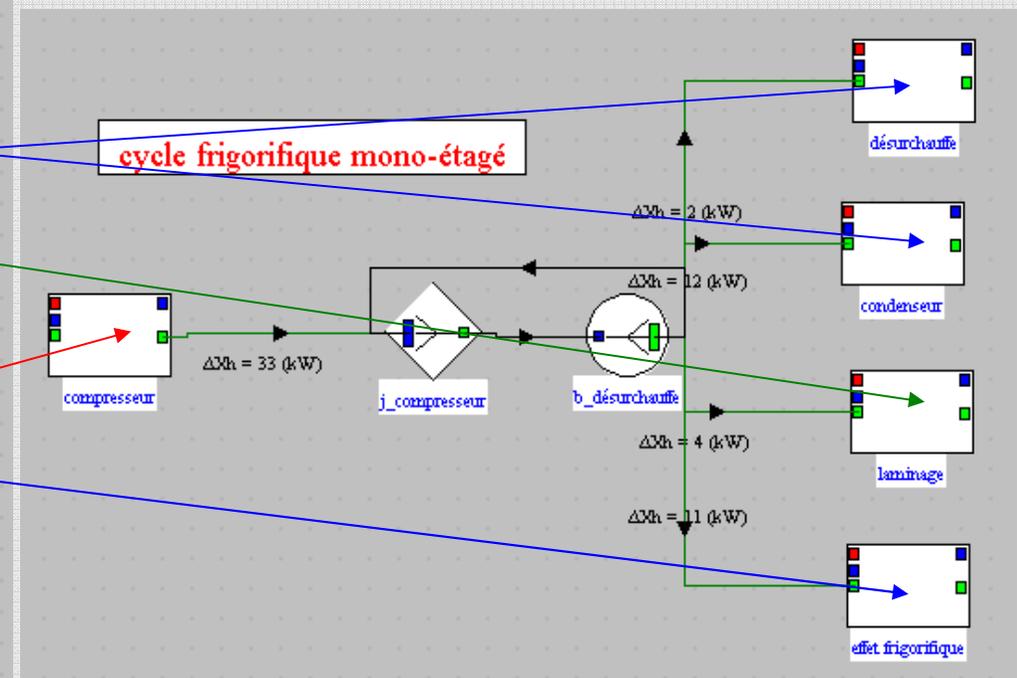
STRUCTURES PRODUCTIVES

➤ schéma physique



structure productive

bilans exergetiques des composants



★ STRUCTURES PRODUCTIVES

➤ bilan exergetique global, automatiquement généré

composant	Ressource	Produit	rend. exergetique	Irréversibilités	% total	paramétrages
laminage	4,024	0	0	4,024	0,1386	
compresseur	39,797	32,845	0,825308	6,952	0,2394	compr
désurchauffe	1,681	0	0	1,681	0,05789	Tk = 15,00 °C
condenseur	11,782	0	0	11,782	0,4058	Tk = 15,00 °C
effet frigorifique	15,358	10,761	0,700701	4,597	0,1583	Tk = -3,00 °C
global	39,797	10,761	0,2704	29,036	1	