



Université
de Toulouse



Laboratoire de Génie Chimique, UMR 5503 CNRS
TOULOUSE, France
R. Théry, G. Hétreux, M. Agha

Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes,
UPR 8001 CNRS, TOULOUSE, France
C. Artigues, P. Lopez, C. Mercé



Programme
Interdisciplinaire Energie
du CNRS



Projets PRIME et GIMEP

—

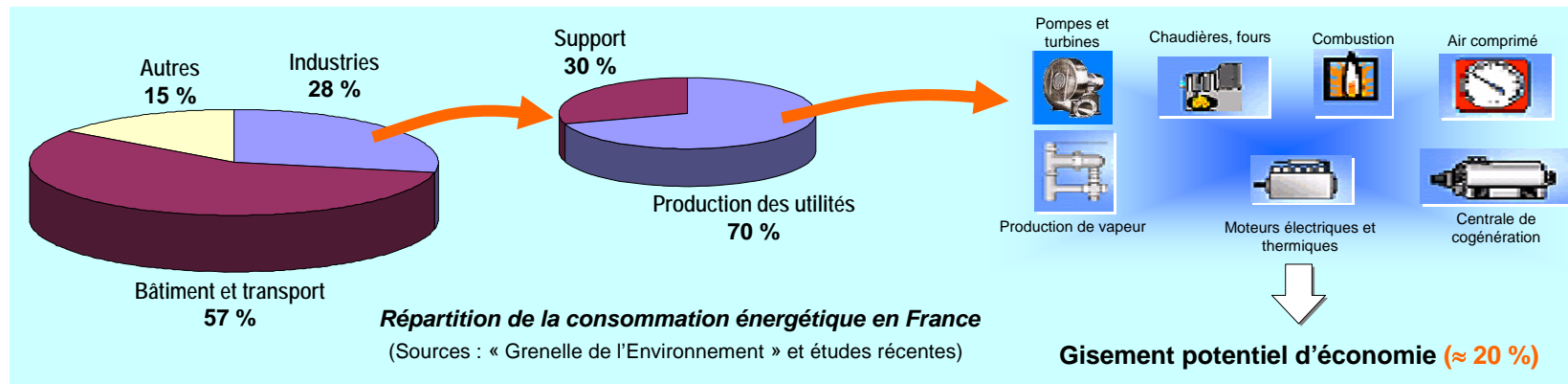
CONDUITE COUPLEE DES ATELIERS BATCH ET DES CENTRALES D'UTILITES

G. HETREUX

Colloque Energie - CNRS
Lundi 16-18 Novembre 2009 - Ecole Polytech'Nantes, Nantes

POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE

- Dans un contexte de développement durable, la question énergétique constitue un des problèmes majeurs des décennies à venir ...
- Thématique pluridisciplinaire, les retombées des recherches dans le domaine de l'énergie se situent à différents horizons de temps :



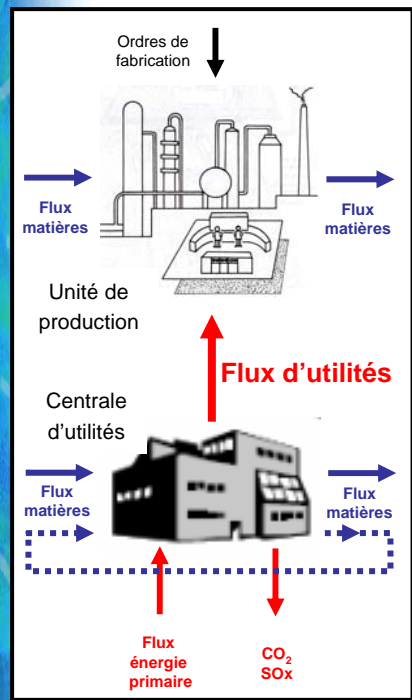
Amélioration de l'efficacité énergétique des procédés par une meilleure exploitation des flux énergétiques **sans rupture technologique** mais par de **meilleures pratiques**, notamment au niveau de la conduite des systèmes de production

Projet exploratoire PRIME (1 an) et projet de recherche GIMEP (2 ans)

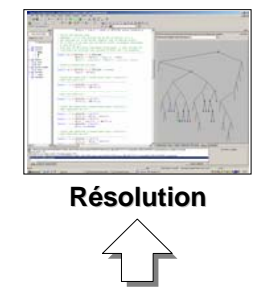
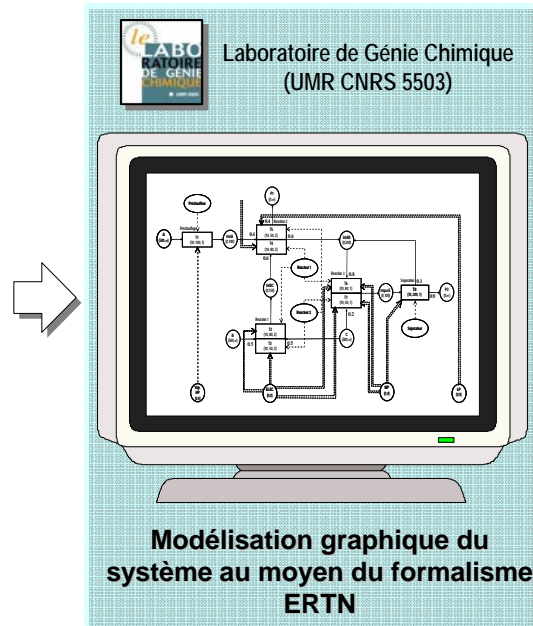
- Concerne le thème fléché de l'appel à projet intitulé « *méthodes de modélisation et d'optimisation innovantes en vue de la définition et de la conduite optimale des systèmes multi-énergies* »

POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE

- **Synoptique des travaux réalisés dans le cadre du projet**
 - Comparaison de différentes **stratégies de gestion** des utilités
 - **Outils** pour la modélisation et la résolution des systèmes considérés,



Système de production à modéliser



LABO
RATOIRE
DE GÉNIE
CHIMIQUE

Laboratoire de Génie Chimique (UMR CNRS 5503)

Modèle générique de Programmation linéaire en variables mixtes basé sur une formulation à temps discret

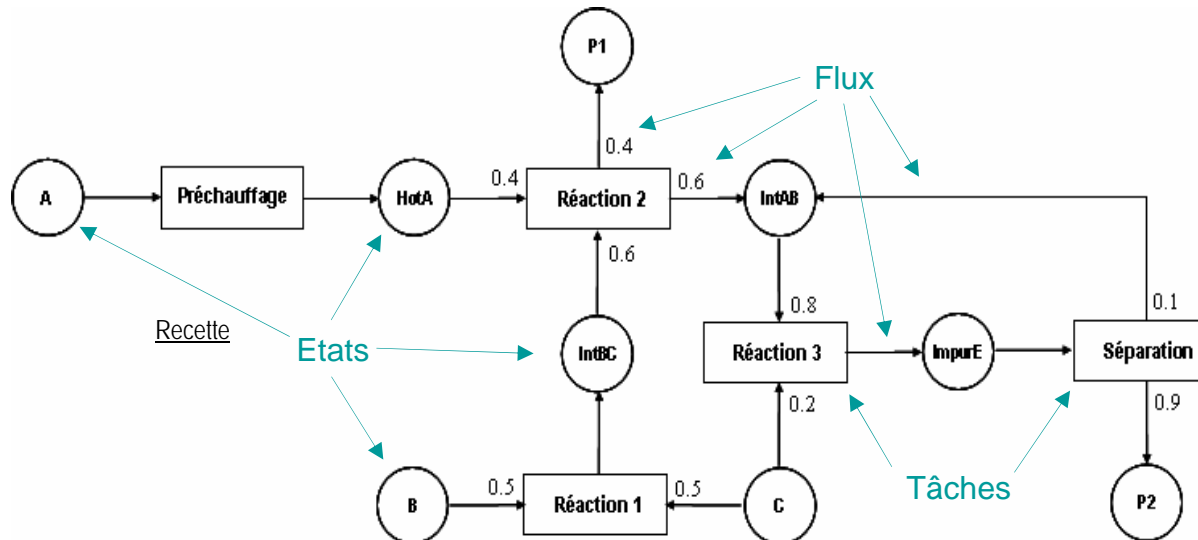
Méthode hybride programmation par contraintes / programmation linéaire en nombres entiers basée sur une formulation à points d'événement

LAAS Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (UPR 8001 CNRS)

ELEMENTS SEMANTIQUES DU FORMALISME E.R.T.N.

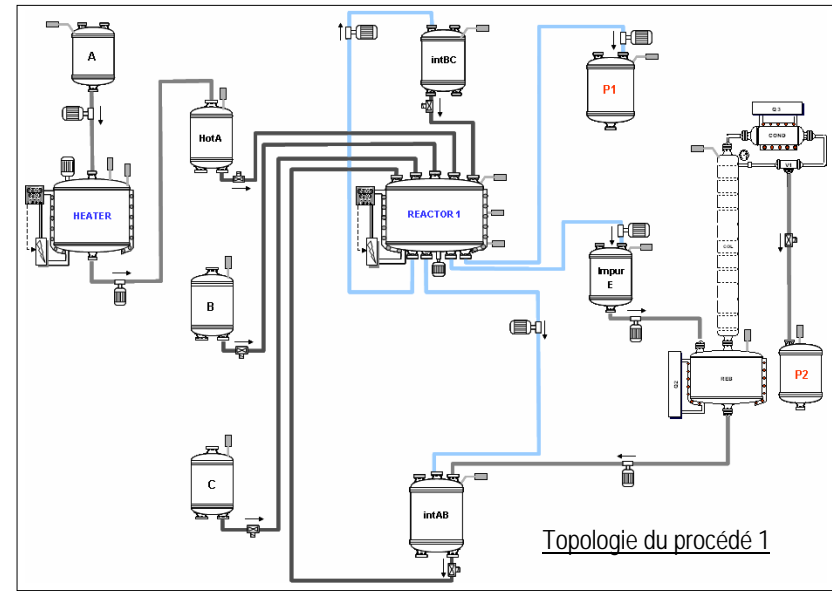
NOM	SYMBOLE	PARAMETRES	REPRESENTE
Nœud Tâche	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> Task k $(V_k^{\min}, V_k^{\max}, p_k, dd_k)$ </div>	V_k^{\min} : taille de lot minimale V_k^{\max} : taille de lot maximale p_k : temps de traitement dd_k : délai d'obtention	opérations de transformation
Nœud "ressource cumulative"	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 10px; text-align: center;"> Resource Name $(R0_r, C_r^{\max})$ </div>	$R0_r$: quantité initiale de ressource r C_r^{\max} : capacité maximale de stockage de la ressource r	ressources partagées (il peut s'agir de ressources matière ou de ressources utilisés)
Nœud "ressource disjonctive"	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 10px; text-align: center;"> Resource Name </div>		ressources qui ne peuvent être partagées par différentes tâches. Il peut s'agit des machines ou des ressources humaines.
Arc "flux matière fixé"		$\rho_{k,r}^{\text{cons}}$: proportion de ressource matérielles r consommées par le tâche $\rho_{k,r}^{\text{prod}}$: proportion de ressource matérielles r produites par le tâche	Flux de matière entrant ou sortant d'un nœud tâche dans des proportions connues a priori
Arc "flux matière libre"			Flux de matière entrant ou sortant d'un nœud tâche dans des proportions inconnues a priori et déterminée par solveur d'optimisation.
Arc "flux ressource utilité"		$wf_{k,r}^{\text{cons}}$: consommation fixe de la ressource utilité r $wv_{k,r}^{\text{cons}}$: consommation variable de ressource utilité r $wf_{k,r}^{\text{prod}}$: production fixe de ressource utilité r $wv_{k,r}^{\text{prod}}$: production variable de ressource utilité r	Production et/ou consommation de ressources de type "utilités" lors de l'exécution d'une opération de transformation.
Arc "ressource disjonctive"			Lien entre l'opération de transformations et les ressources disjonctives dédiées à ces opérations
Arc "démarrage"			Traduit la nécessité de lancer une tâche de redémarrage (task1) avant la tâche (Task2) dans le cas où la machine était inactive à l'intervalle de

FORMALISME E.R.T.N. : Exemple illustratif



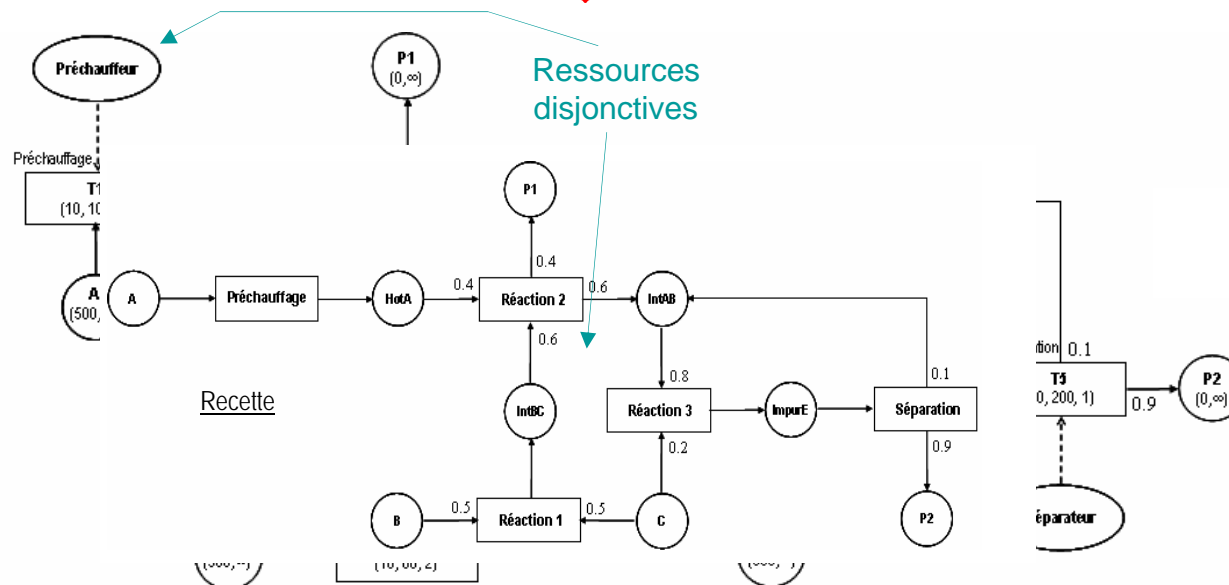
FORMALISME E.R.T.N. : Exemple illustratif

Cas d'appareils utilisables pour réaliser plusieurs opérations différentes



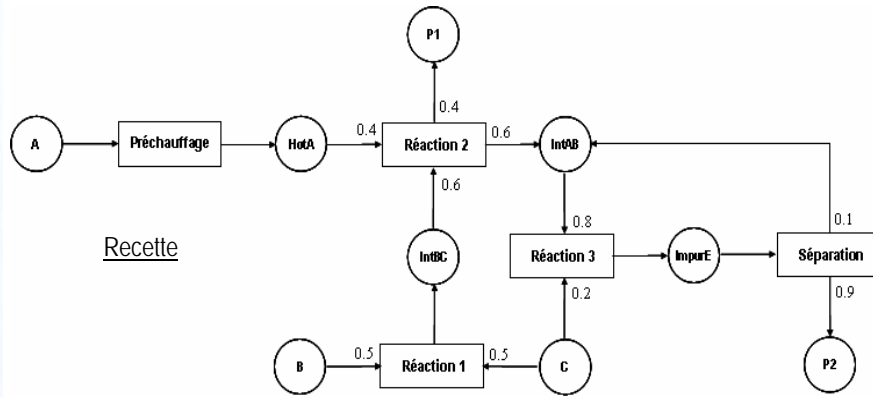
Recette constituée de 5 opérations

Réacteur 1 \Rightarrow réaction 1, 2 et 3

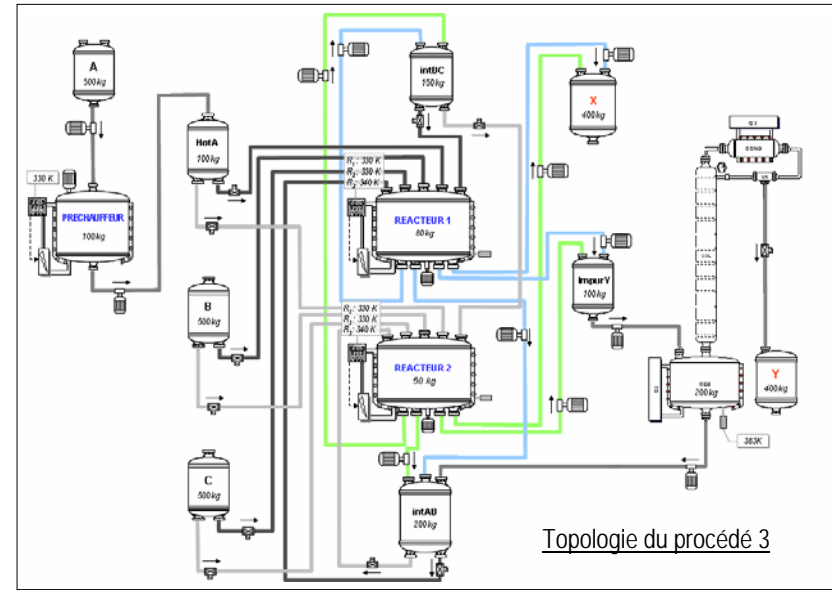


FORMALISME E.R.T.N. : Exemple illustratif

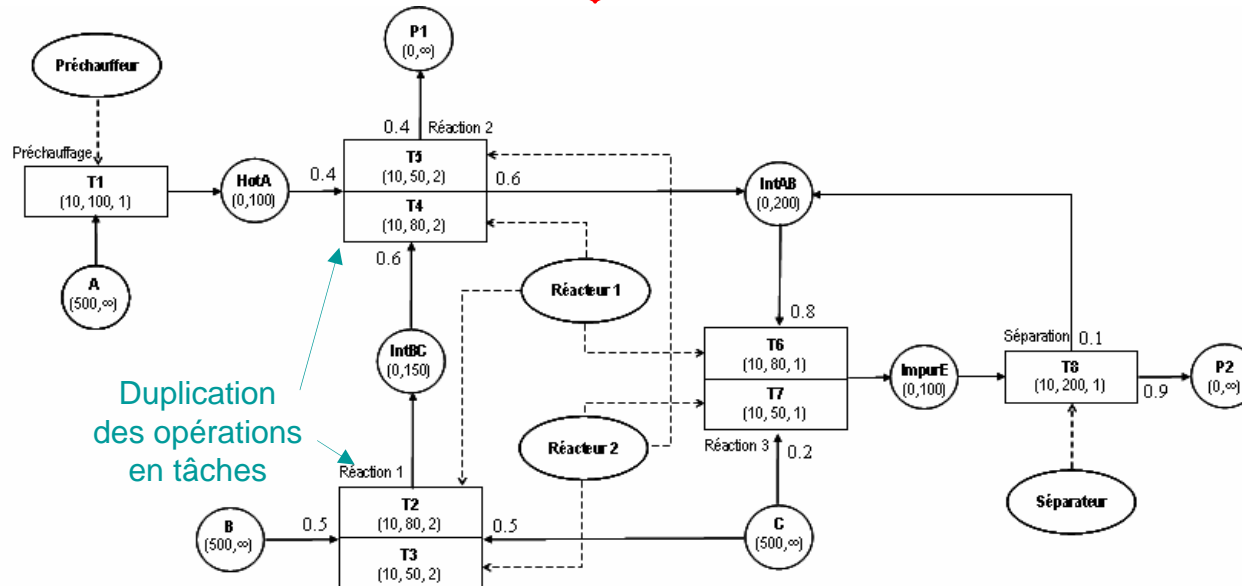
Cas d'opérations réalisables dans plusieurs appareils différents



Recette constituée de 5 opérations

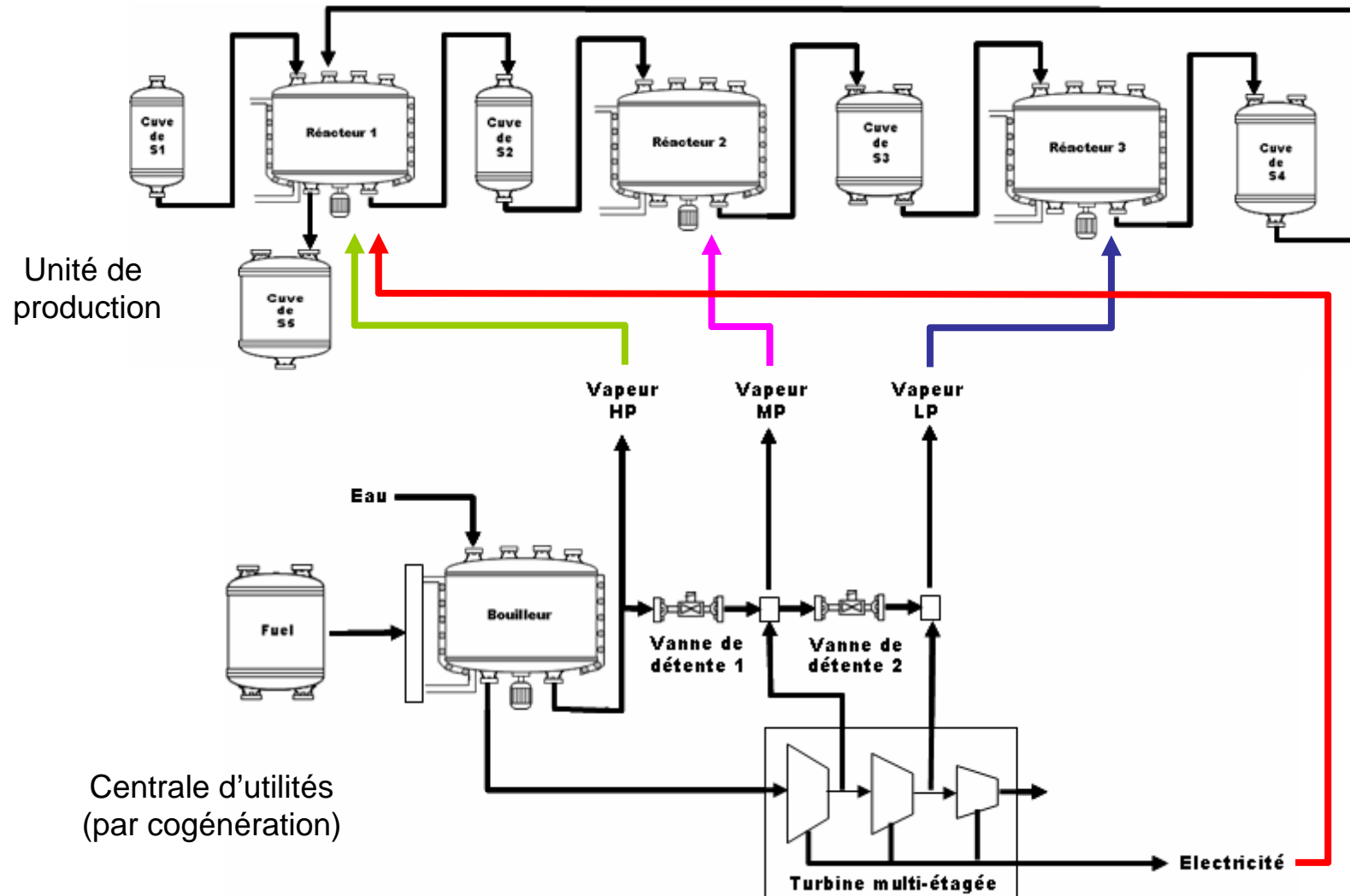


Réacteur 1 \Rightarrow réaction 1, 2 et 3 Réacteur 2 \Rightarrow réaction 1, 2 et 3



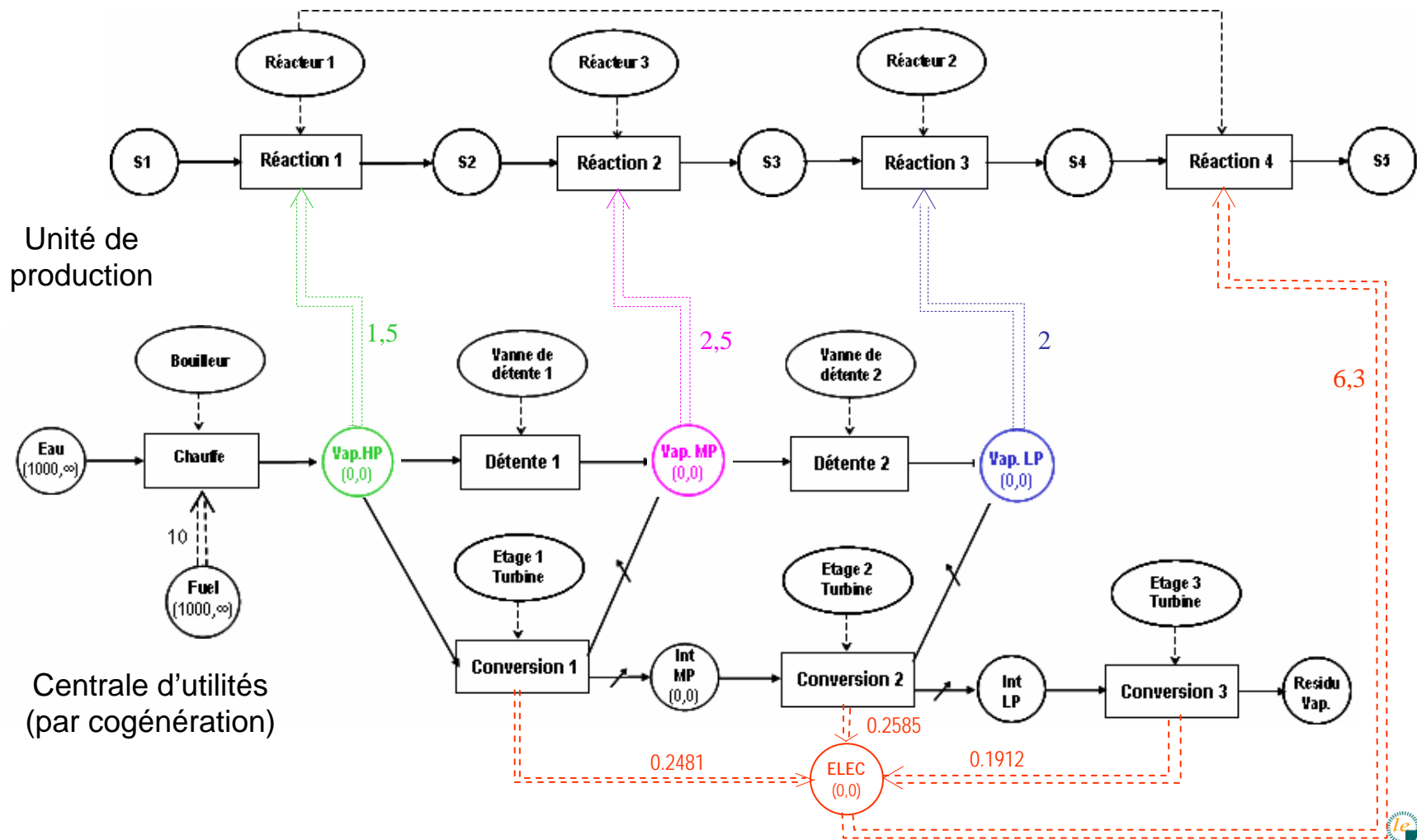
FORMALISME E.R.T.N. : Dualité des ressources

- Certains états peuvent être considérés soit comme des **états matières intermédiaires** lors de leur production soit comme des **ressources énergétiques** lors de leur consommation



FORMALISME E.R.T.N. : Dualité des ressources

- Certains états peuvent être considérés soit comme des **états matières intermédiaires** lors de leur production soit comme des **ressources énergétiques** lors de leur consommation



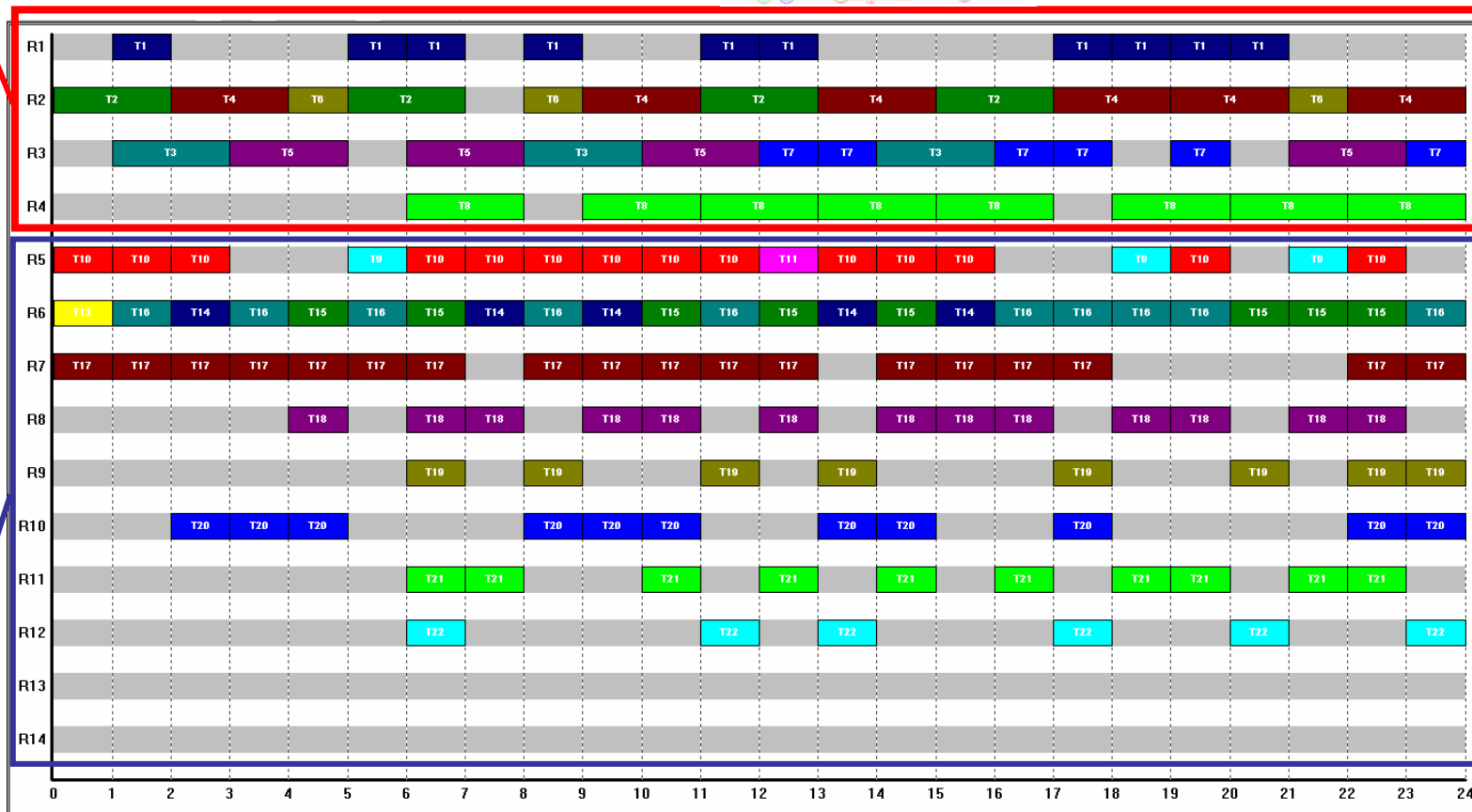
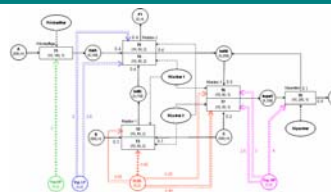
MODÈLE MATHÉMATIQUE ASSOCIÉ

- Correspondance directe entre structures sémantiques et contraintes du modèle mathématique

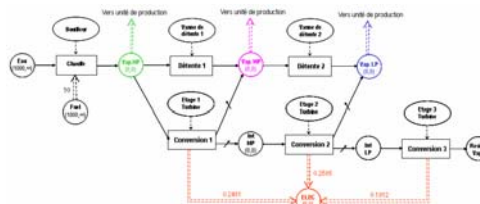
NOM	SYMBOLE	EQUATION
Contrainte de capacité des tâches		$0 \leq R_{r,t} \leq C_r^{\max} \quad \forall r \in R, \forall t \in T$ [Eq. IV-1]
Contrainte de capacité des ressources cumulatives		$W_{k,t} V_k^{\min} \leq B_{k,t} \leq W_{k,t} V_k^{\max} \quad \forall k \in K, \forall t \in T$ [Eq. IV-2]
Contrainte d'allocation des ressources		$\sum_{k \in K, t=1}^t W_{k,t} \leq 1 \quad \forall j \in J, \forall t \in T$ [Eq. IV-3]
Bilan matière pour chaque ressource		$R_{r,t} = R_{r,t-1} + \sum_{k \in K} O_{r,k,t} - \sum_{k \in K} I_{r,k,t} + \sum_{k \in K} UO_{r,k,t} - \sum_{i \in I} UI_{r,i,t} + In_{r,t} - Out_{r,t} \quad \forall r \in R, \forall t \in T$ [Eq. IV-4]
		$R_{r,0} = R_0 \quad \forall r \in R, \forall t \in T$ [Eq. IV-5]
		$Out_{r,t}^{\min} \leq Out_{r,t} \leq Out_{r,t}^{\max} \quad \forall r \in R, \forall t \in T$ [Eq. IV-6]
		$In_{r,t}^{\min} \leq In_{r,t} \leq In_{r,t}^{\max} \quad \forall r \in R, \forall t \in T$ [Eq. IV-7]
		$Out_{r,t}^{\min} = Out_{r,t}^{\max} = D_{r,t} \quad \forall r \in R, \forall t \in T$ [Eq. IV-8]
Bilan matière au niveau de chaque tâche		$B_{k,t} = \sum_{r \in R_k^{prod}} O_{r,k,t} \quad \forall k \in K, \forall t \in T$ [Eq. IV-9]
		$B_{k,t} = \sum_{r \in R_k^{cons}} I_{r,k,t} \quad \forall k \in K, \forall t \in T$ [Eq. IV-10]
		$O_{r,k,t} \leq (\rho_{k,r}^{prod} + \mu_{k,r}^{prod}) B_{k,t} \quad \forall k \in K, \forall r \in R_k^{prod}, \forall t \in T$ [Eq. IV-11]
		$O_{s,k,t} \geq \rho_{k,s}^{prod} B_{k,t} \quad \forall k \in K, \forall r \in R_k^{prod}, \forall t \in T$ [Eq. IV-12]
		$I_{s,k,t} \leq (\rho_{k,s}^{cons} + \mu_{k,s}^{cons}) B_{k,t} \quad \forall k \in K, \forall r \in R_k^{cons}, \forall t \in T$ [Eq. IV-13]
$I_{s,k,t} \geq \rho_{k,s}^{cons} B_{k,t} \quad \forall k \in K, \forall r \in R_k^{cons}, \forall t \in T$ [Eq. IV-14]		
Contrainte de consommation de ressource cumulative		$UI_{s,k,t} = ufi_{k,s} W_{k,t} + uvi_{k,s} \sum_{\theta=t-P_k+1}^t B_{k,\theta} \quad \forall r \in R, \forall k \in K, \forall t \in T$ [Eq. IV-15]
Contrainte de production de ressource cumulative		$UO_{s,k,t} = ufo_{k,s} W_{k,t} + uvo_{k,s} \sum_{\theta=t-P_k+1}^t B_{k,\theta} \quad \forall r \in R, \forall k \in K, \forall t \in T$ [Eq. IV-16]
Modélisation d'équipements multimodaux		$W_{k,t+1} = W_{k,t} + (1 - W_{k,t-1}) \quad \forall j \in J^{act}, \forall k \in K_j^{op}, \forall t \in 2, \dots, T-1$ [Eq. IV-17]
		$W_{k',t} \geq W_{k,t+1} - W_{k,t} \quad \forall j \in J^{act}, \forall k \in K_j^{op}, \forall k' \in K_j^{act}, \forall t \in 2, \dots, T-1$ [Eq. IV-18]
		$W_{k',t} \leq W_{k,t+1} \quad \forall j \in J^{act}, \forall k \in K_j^{op}, \forall k' \in K_j^{act}, \forall t \in 2, \dots, T-1$ [Eq. IV-19]

EXEMPLE DE DIAGRAMME DE GANTT

Plan de fabrication au niveau de l'unité de production



Plan de production des utilités au niveau de la centrale de cogénération



ANALYSE DE DIFFERENTES APPROCHES DE GESTION DES UTILITES

● Caractéristiques des systèmes de production considérés dans l'étude

■ Caractéristiques des procédés considérés :

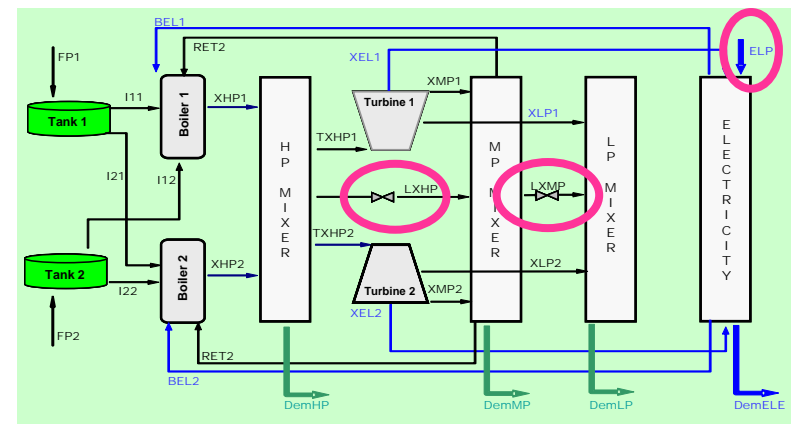
- procédés discontinus où la matière transite sous forme de lots (*batch*),
- à topologie réseau (*possibilité de mélange ou de division de lot, recyclage, ...*),
 - ⇒ *nécessite de déterminer le nombre et la taille des batch (bilan matière)*
- multi-produits (*recettes couplées*) et multi-ressources (*appareils et utilités partagés*),
 - ⇒ *nécessite d'effectuer une allocation des ressources*
- conduit par la recette et satisfaction d'*OF* et/ou de commandes non régulières.

■ Caractéristiques des centrales d'utilités considérées :

- centrale de cogénération produisant de la vapeur à différentes pressions et de l'électricité
- production des utilités à la demande avec voies alternatives,
- fonctionnement en mode continu avec changement de régime
 - ⇒ **Amélioration du rendement énergétique si la cogénération est maximisée**

■ Critère :

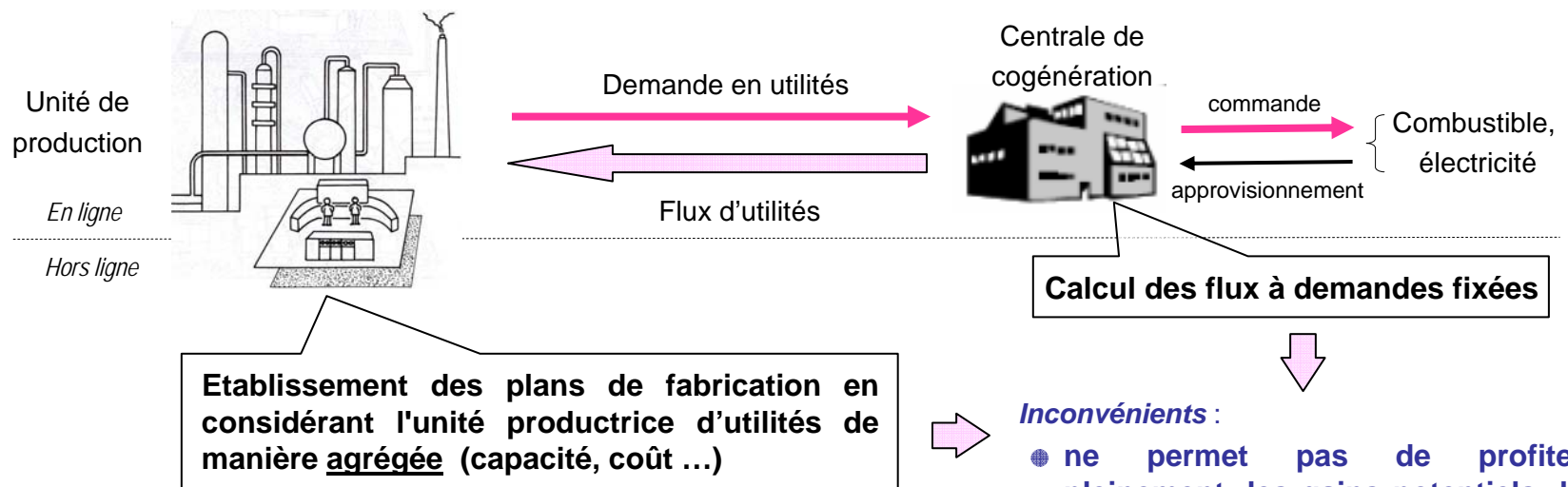
- minimisation du retard et du coût énergétique



ANALYSE DE DIFFERENTES APPROCHES DE GESTION DES UTILITES

● Organisation généralement rencontrée sur les sites industriels (*approche séquentielle*)

L'unité consommatrice (la *production*) est le donneur d'ordre de la centrale de production d'utilités (*relation maitre/esclave*).



Inconvénients :

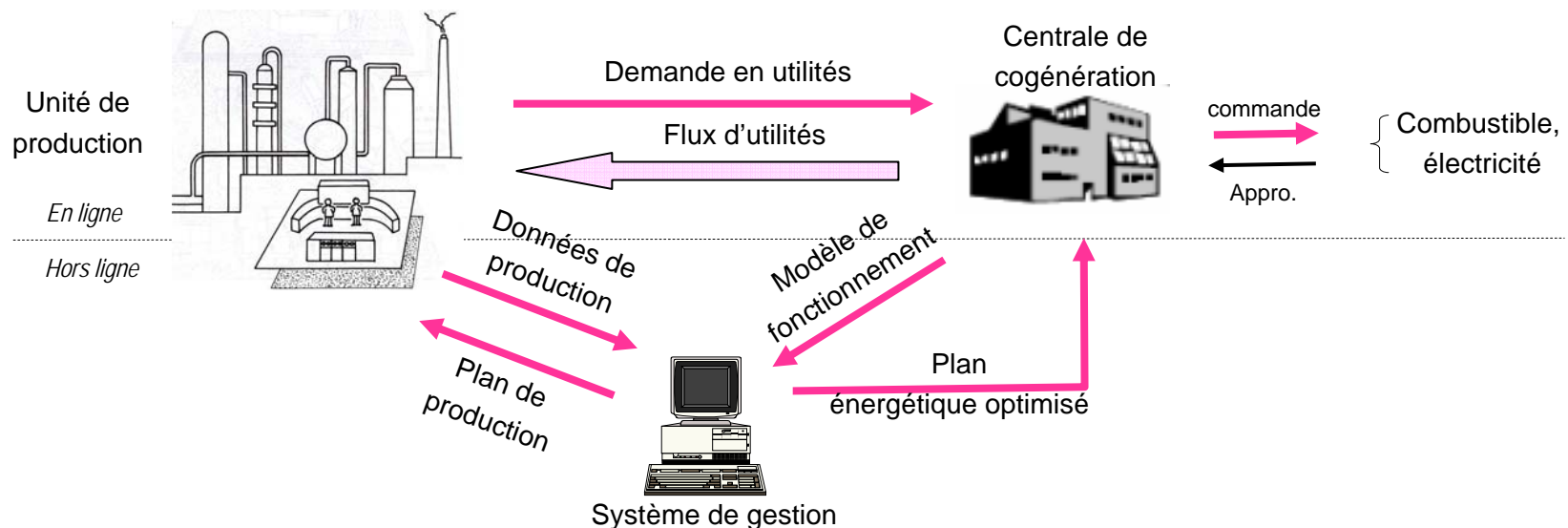
- ne permet pas de profiter pleinement des gains potentiels de la cogénération,
- peut conduire à l'infaisabilité du plan de production par une surcharge ponctuelle de la centrale d'utilité.

APPROCHE PROPOSEE

- Organisation généralement rencontrée sur les sites industriels (*approche séquentielle*)

L'unité consommatrice (la *production*) est le donneur d'ordre de la centrale de production d'utilités (*relation maître/esclave*).

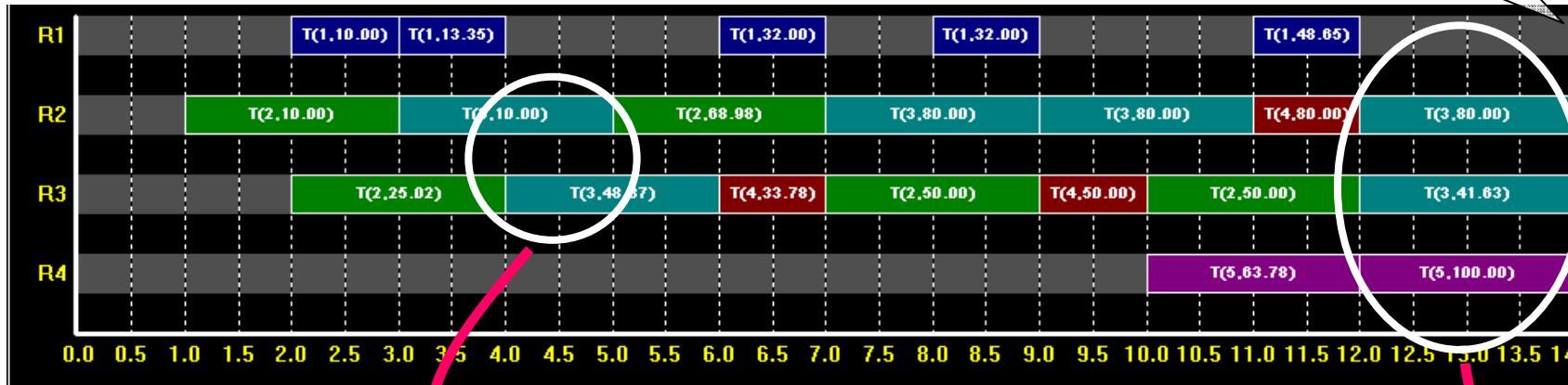
- Organisation dans laquelle la conduite de la production prend en compte le fonctionnement de la centrale de cogénération afin d'améliorer l'efficacité énergétique global du système (*approche intégrée*)



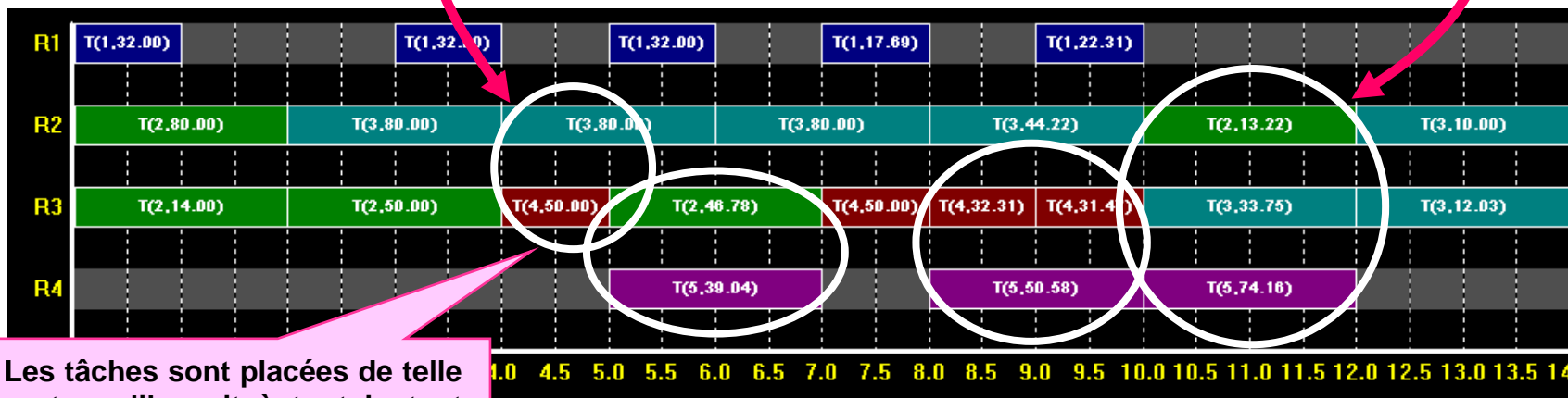
QUELQUES RESULTATS ...

Approche séquentielle






Date de livraison des 2 produits finis



Approche Intégrée



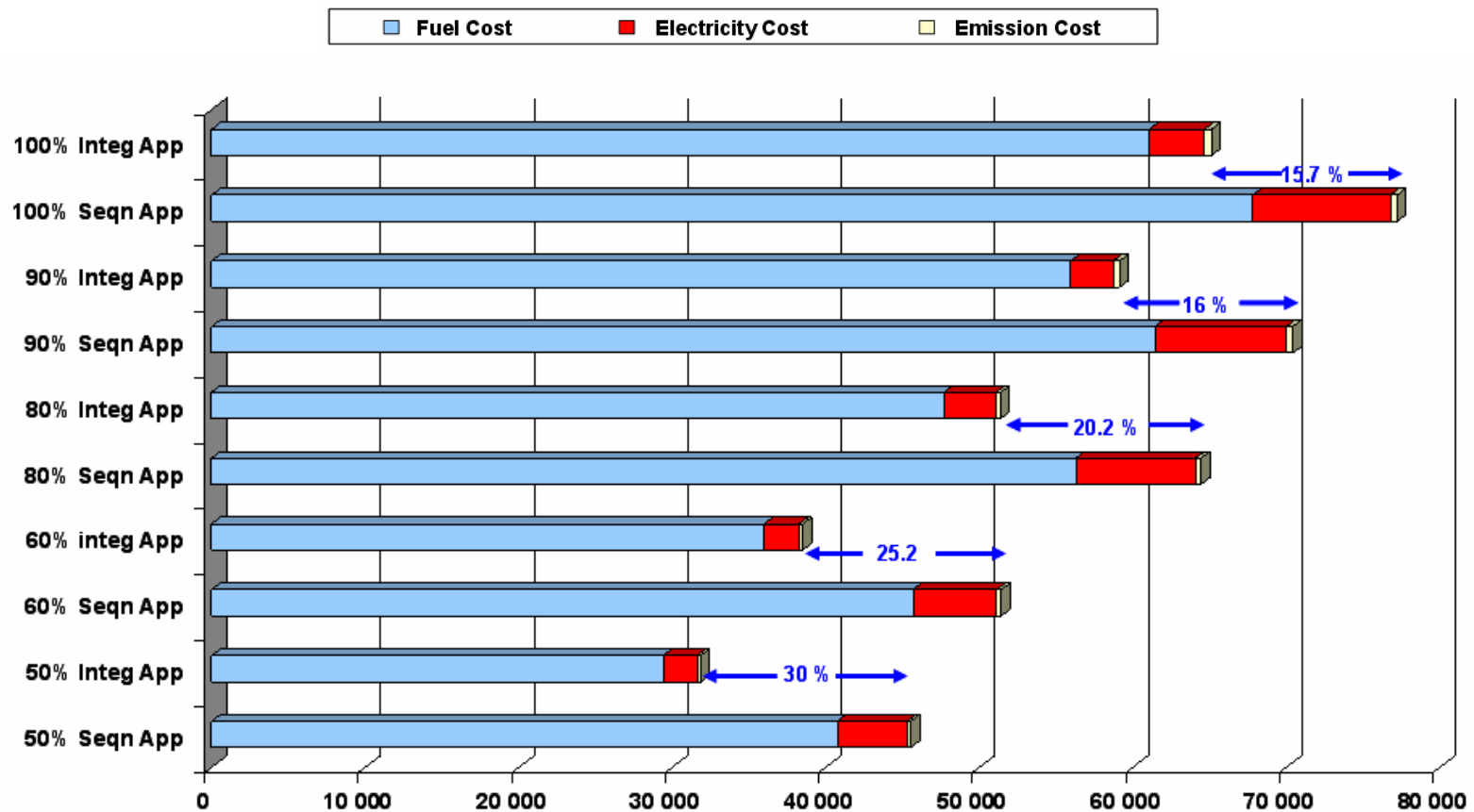
Les tâches sont placées de telle sorte qu'il y ait à tout instant une consommation simultanée en électricité et en vapeur

	Vapeur HP		Vapeur LP		Vapeur MP
	Electricité		Vapeur MP + Electricité		

QUELQUES RESULTATS ...

- Permet une utilisation plus efficace de la cogénération

- Quelque soit la topologie du procédé et quelque soit la charge de l'atelier, une **réduction significative du coût énergétique** est obtenu

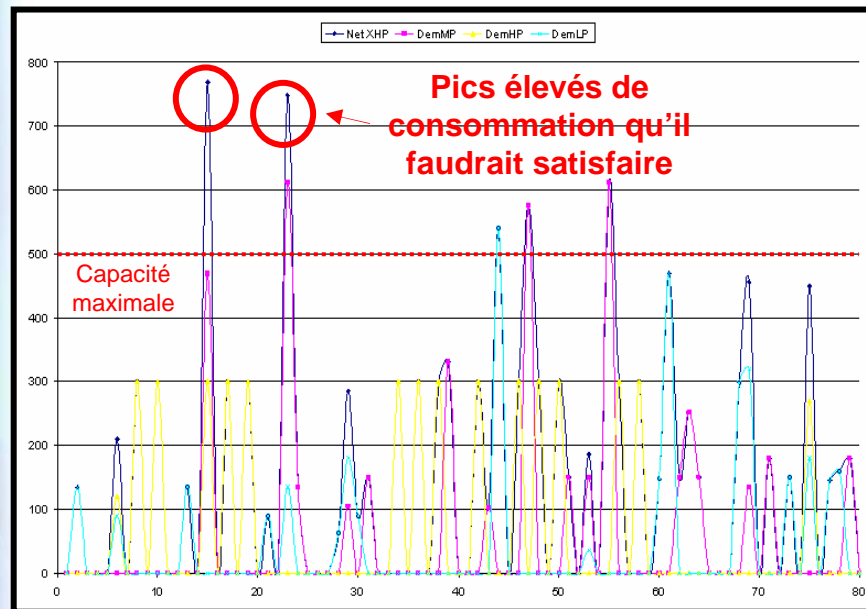


QUELQUES RESULTATS ...

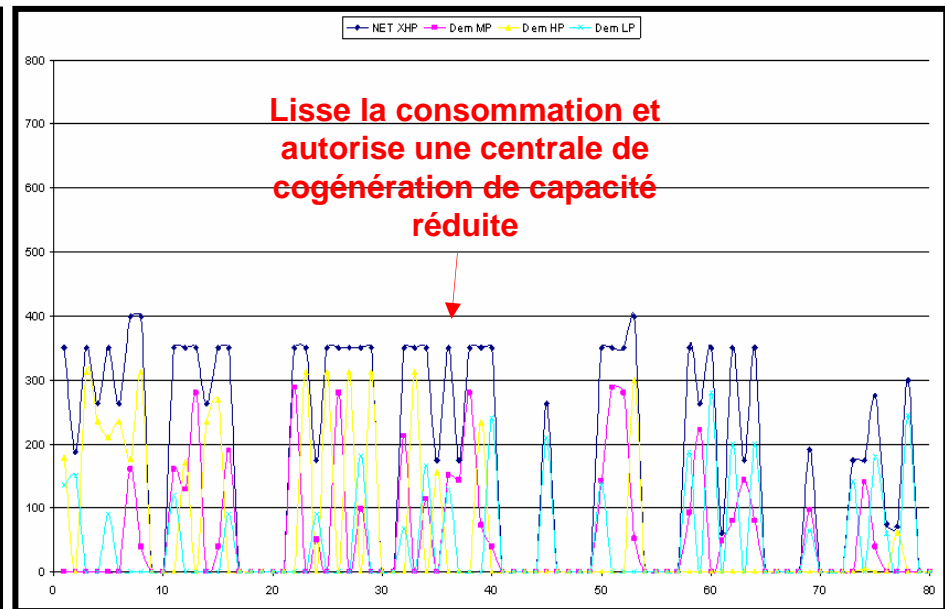
● Permet une utilisation plus efficace de la cogénération

- Détermination de plans de production compatibles avec la capacité effective de la centrale d'utilités
 - ⇒ Meilleure cohérence des décisions entre l'unité de production et la centrale d'utilités

Besoins en vapeur HP, MP et LP au cours du temps



Approche séquentielle



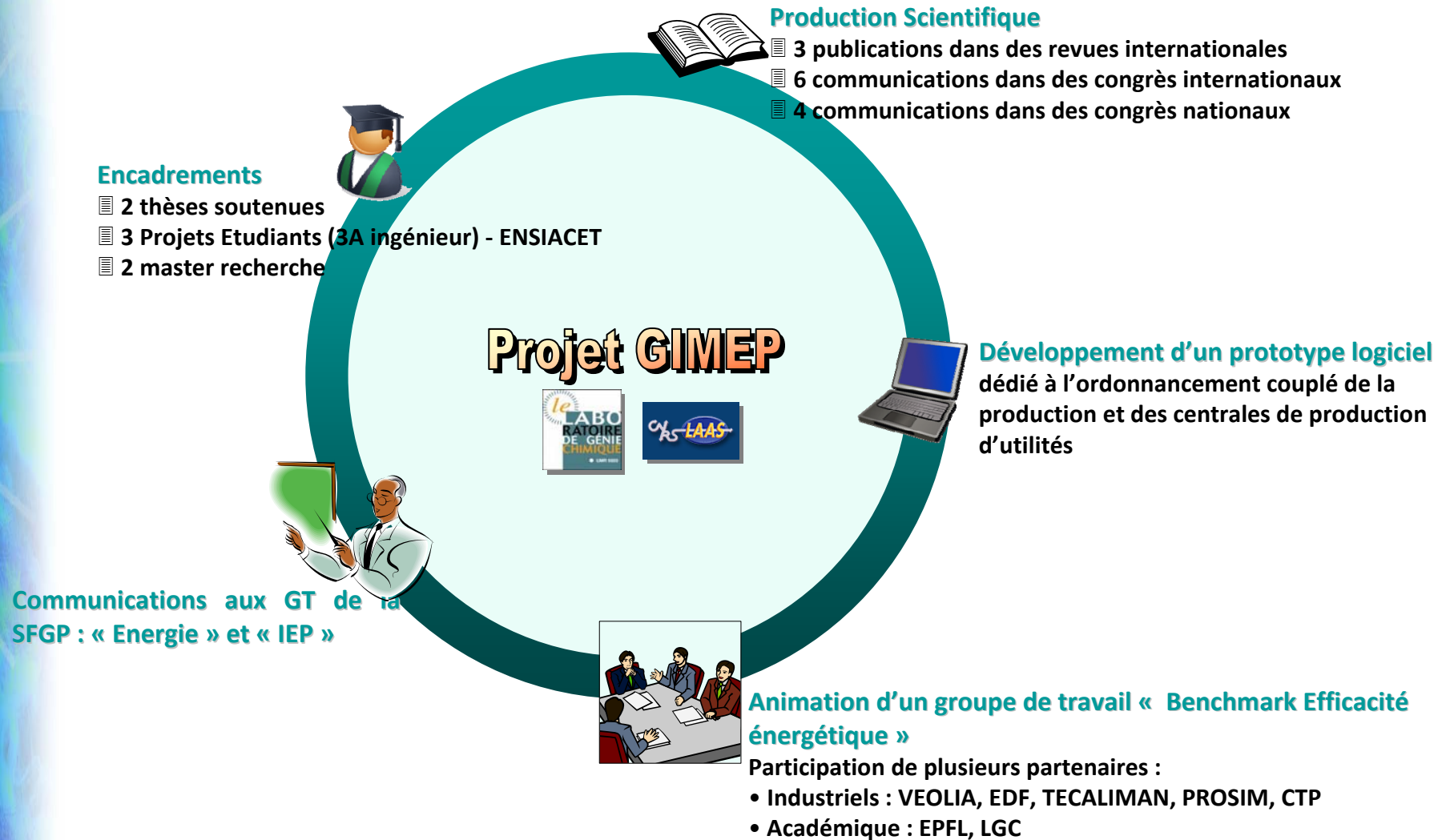
Approche intégrée

- Lisse la consommation en utilités

⇒ Facilite le contrôle de la centrale en évitant les changements de régime trop brusques et trop fréquents

- Evite le sur-dimensionnement de la centrale d'utilités pour absorber des pics ponctuels de consommation

VALORISATION DES TRAVAUX REALISES



CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Contributions d'ordre méthodologique et pratique :

- Définition du **formalisme graphique ERTN** pour représenter de manière uniforme les unités consommatrice et productrice d'énergie,
- Formulation d'un **modèle mathématique générique** :
 - basé sur les outils de la recherche opérationnelle (*programmation linéaire en variables mixtes, programmation par contraintes, méthode hybride*),
 - dédié à l'ordonnancement des procédés sous contraintes énergétiques,
- Proposition d'un **processus de gestion des utilités « intégré » à la gestion de production** permettant d'atteindre des gains significatifs en terme de coûts et de cohérence des décisions
- Développement en cours d'un **prototype logiciel** mettant en œuvre cette méthodologie et à destination des responsables de production industriels

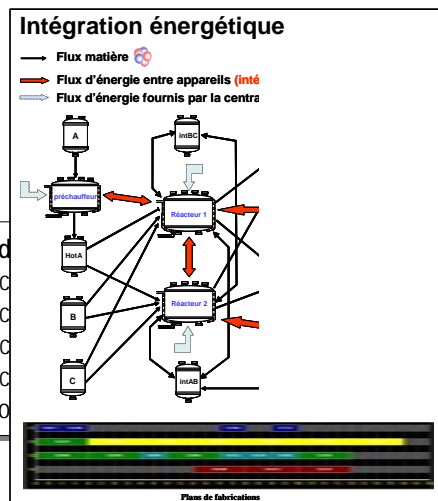
Travaux en cours et Perspectives :

A moyen terme

Affinement de la modélisation de la centrale d'utilités :

- modélisation plus précise des turbines,
- prise en compte d'utilités froide,

Affinement d
- prise en c
- prise en c
d'utilités c
- prise en c
localisatio



utilités :
ions,

- processus de décision itératif et interactif,

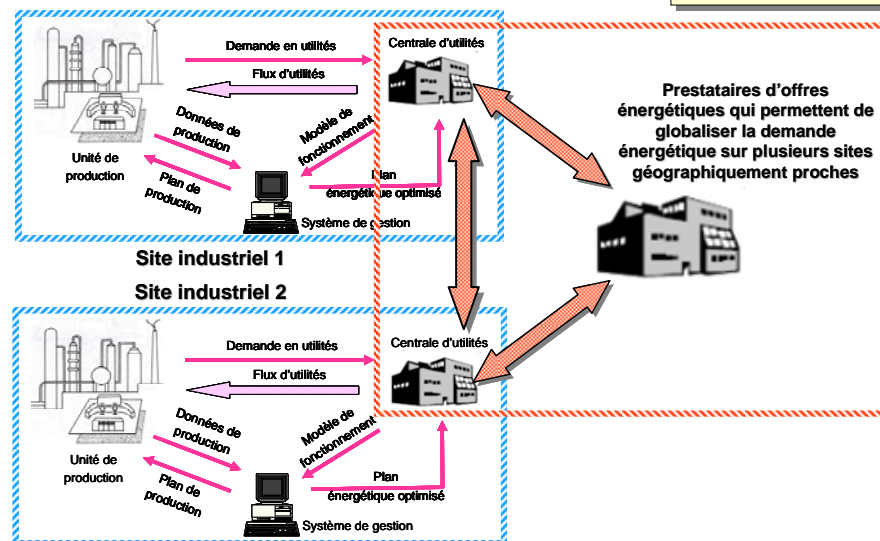
CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Contributions d'ordre méthodologique et pratique :

- Définition du **formalisme graphique ERTN** pour représenter de manière uniforme les unités consommatrice et productrice d'énergie,
- Formulation d'un **modèle mathématique générique** :
 - basé sur les outils de la recherche opérationnelle (*programmation linéaire en variables mixtes, programmation par contraintes, méthode hybride*),
 - dédié à l'ordonnancement des procédés sous contraintes énergétiques,
- Proposition d'un **processus de gestion des utilités « intégré » à la gestion de production** permettant d'atteindre des gains significatifs en terme de coûts et de cohérence des décisions
- Développement en cours d'un **prototype logiciel** mettant en œuvre cette méthodologie et à destination des responsables de production industriels

Travaux en cours et Perspectives :

A moyen terme



● Gestion multi-site de l'énergie

- Constitution de réseaux d'énergie et d'utilités entre sites industriels géographiquement proches par une mutualisation des moyens de production des utilités.

↪ Notion de **parc éco-industriel**

- Extension vers la notion de **chaîne logistique de l'énergie**