



Université
de Toulouse

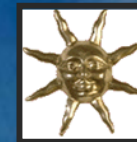


Laboratoire de Génie Chimique, UMR 5503 CNRS
TOULOUSE, France

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



Projet GIMEP

Gestion Intégrée Multisite de l'Energie et de la Production

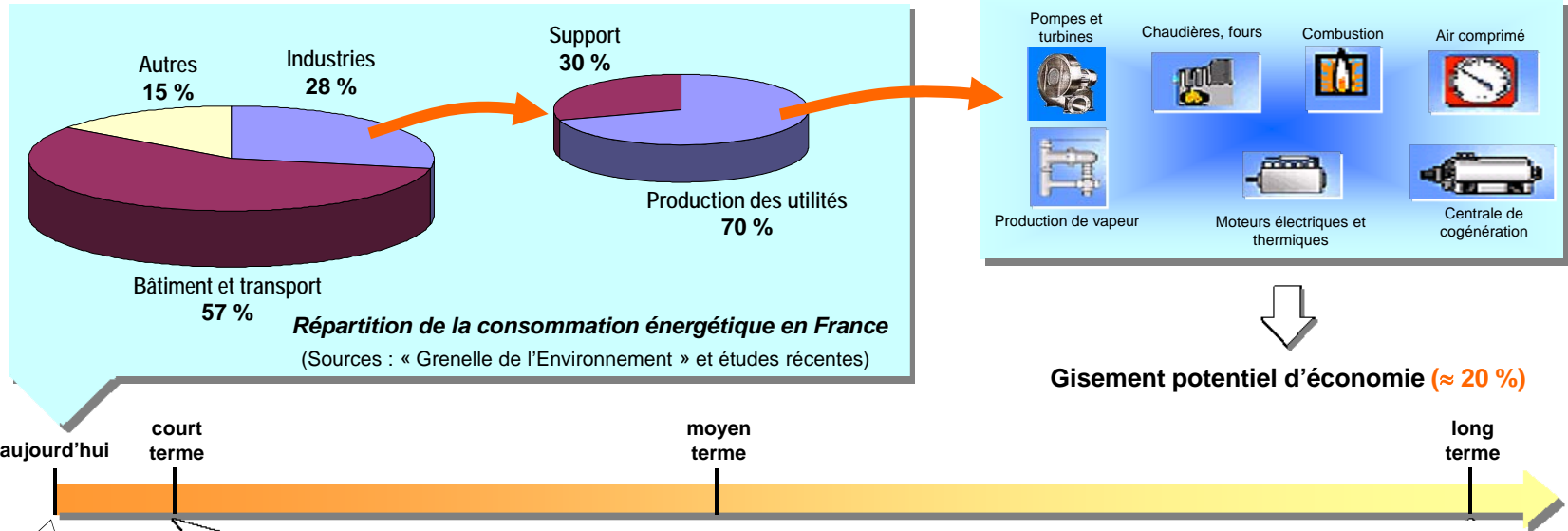
CONDUITE COUPLEE DES ATELIERS BATCH ET DES CENTRALES D'UTILITES

M. AGHA, C. ARTIGUES, G. HETREUX, R. THERY, P. LOPEZ, C. MERCE

Colloque Energie - CNRS
Lundi 28-30 Mars 2011 - Corum de Montpellier

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 :



Energies fossiles,
Energie nucléaire

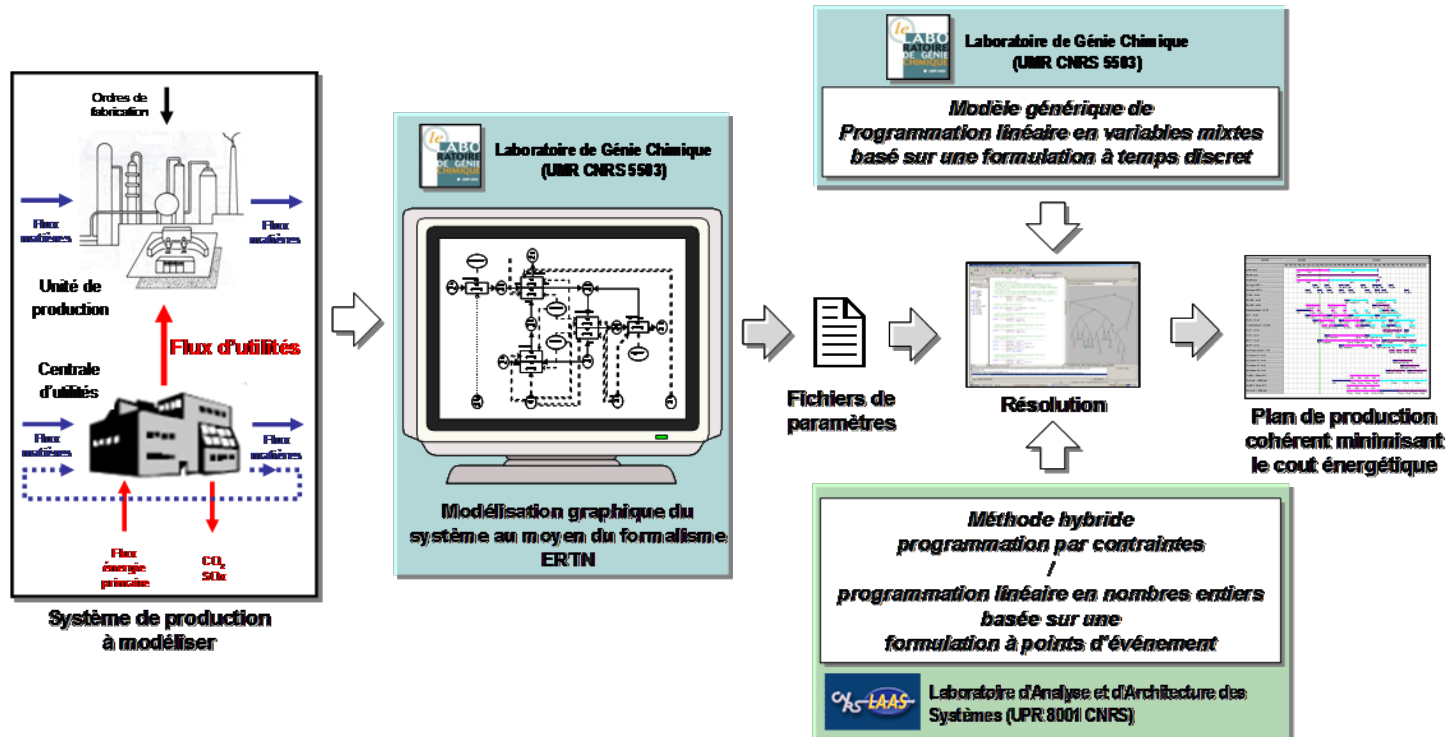
Amélioration de l'efficacité énergétique des procédés par une meilleure exploitation des flux énergétiques **sans rupture technologique** mais par de **meilleures pratiques**, notamment au niveau de la conduite des systèmes de production

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* »

Contributions d'ordre méthodologique et pratique :

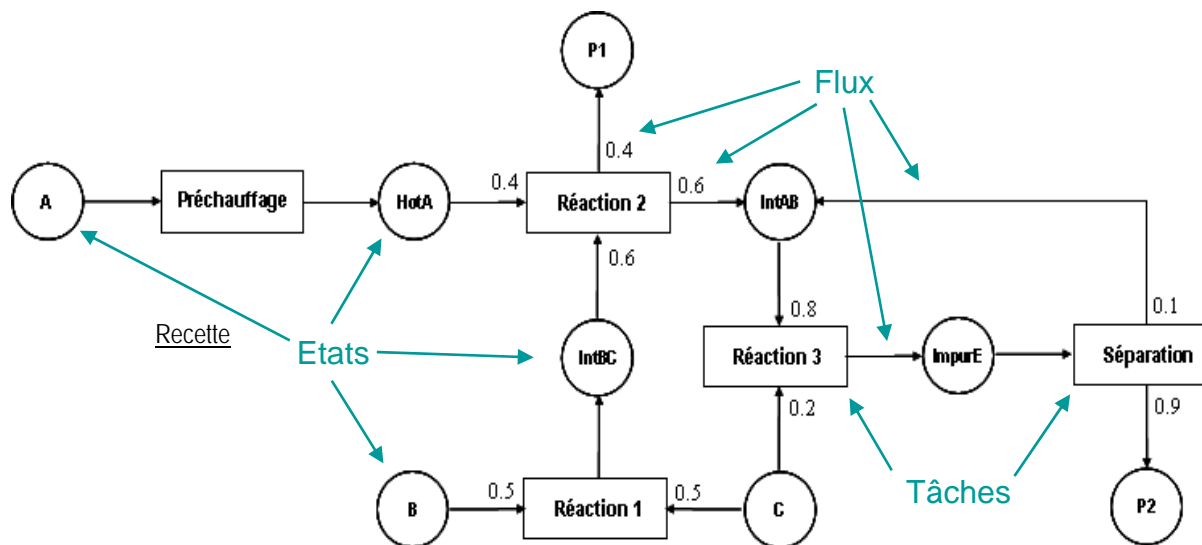
- Définition du **formalisme graphique ERTN** pour représenter de manière uniforme les unités consommatrice et productrice d'énergie,
- Formulation d'un **modèle mathématique générique** :
 - dédié à l'ordonnancement des procédés sous contraintes énergétiques,
 - basé sur les outils de la recherche opérationnelle (*programmation linéaire en variables mixtes, programmation par contraintes, méthode hybride*),
- Comparaison de différentes **stratégies de gestion** des utilités



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

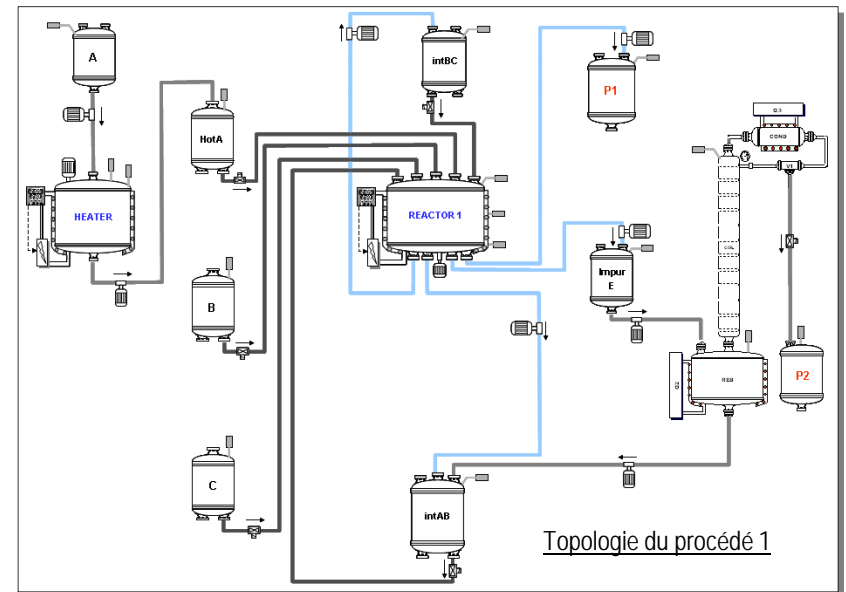
NOM	SYMBOLE	PARAMETRES	REPRESENTE
Nœud Tâche	Tk – Opération ($V_k^{\min}, V_k^{\max}, p_k^f, p_{k,r}, p_{k,d}, d_k$)	V_k^{\min} : taille de lot minimale (kg) V_k^{\max} : taille de lot maximale (kg) p_k^f : partie fixe du temps de traitement (h) $p_{k,r}$: partie variable du temps de traitement dépendant de la taille du lot (h/kg) $p_{k,d}$: partie variable du temps de traitement dépendant de la quantité de ressource consommée (h/kW) d_k : délai d'obtention des matières si différent de la durée de la tâche (h)	opération de transformation discontinue (ou batch)
Nœud Tâche	Tk – Opération ($R_k^{\min}, R_k^{\max}, r_k^f, r_{k,r}$)	R_k^{\min} : débit minimal (kg/h) R_k^{\max} : débit maximal (kg/h) r_k^f : partie fixe du débit (kg/h) $r_{k,r}$: partie variable du débit dépendant de la quantité de ressource consommée (kg/h.kW)	opération de transformation continue ($dd_k = 0$)
Nœud "ressource cumulative"	Sr – Etat ($S0_r, C_r^{\max}$) Politique	$S0_r$: quantité initiale de ressource r C_r^{\max} : capacité maximale de stockage de la ressource r Politique : politique de stockage ou transfert (UIS : stockage illimité, FIS : stockage limité, NIS : pas de stockage, ZW : transfert sans attente)	ressources cumulatives (matière, utilités, financière, etc)
Nœud "ressource disjonctive"	Ressource		ressources partagées de manière exclusive par différentes tâches (appareils, ressources humaines, etc).
Nœud "Etat ressource"	Sr – Etat ($S0_r, C_r^{\max}$)	$S0_r$: marquage initial de l'état associé à la ressource r ($S0_r=0$: état non actif, $S0_r > 0$: état actif) C_r^{\max} : marquage maximale de l'état associé à la ressource r	noeud dont le marquage matérialise l'état dans lequel se trouve une ressource multimodale .
Arc "flux fixé"		$\rho_{k,r}^{\text{cons}}$: proportion fixe de ressource r consommée par la tâche k pour les transformer en ressources sortantes $\rho_{k,r}^{\text{prod}}$: proportion fixe de ressource r produite par la tâche k par transformation des ressources entrantes	volume ou flux de matière entrant ou sortant d'un nœud tâche égal à une proportion fixée de la quantité traversant ce noeud
Arc "flux libre"		$\mu_{k,r}^{\text{cons}}, \mu_{k,r}^{\text{prod}}$: paramètres matérialisant la présence ou pas d'un flux libre. Utilisé en conjonction avec les paramètres $\rho_{k,r}^{\text{cons}}$ et $\rho_{k,r}^{\text{prod}}$ selon les règles suivantes : - si flux libre en entrée (resp. sortie) de la tâche k alors $\rho_{k,r}^{\text{cons}} = 0, \mu_{k,r}^{\text{cons}} = 1$ (resp. $\rho_{k,r}^{\text{prod}} = 0, \mu_{k,r}^{\text{prod}} = 1$) - si flux fixé en entrée (resp. sortie) de la tâche k alors $0 > \rho_{k,r}^{\text{cons}} \geq 1, \mu_{k,r}^{\text{cons}} = 0$ (resp. $0 > \rho_{k,r}^{\text{prod}} \geq 1, \mu_{k,r}^{\text{prod}} = 0$)	volume ou flux de matière entrant ou sortant d'un nœud tâche dans des proportions non fixées a priori et déterminées par l'optimisation.
Arc "flux consommé" ou "flux produit"		$U_{k,r}^{\text{cons}}$: partie fixe de la consommation de ressource r par la tâche k $U_{k,r}^{\text{var,cons}}$: partie variable de la consommation de ressource r dépendant de la quantité de matière transformée par la tâche k $U_{k,r}^{\text{prod}}$: partie fixe de la production de ressource r par la tâche k $U_{k,r}^{\text{var,prod}}$: partie variable de la production de ressource r dépendant de la quantité de matière transformée par la tâche k	volume ou flux de ressources cumulatives consommées ou produites mais non transformées lors de l'exécution d'une tâche
Arc "utilise"	----->	$J_{k,i}$: la composant $J_{k,i}=1$ si la tâche i peut être réalisée sur la ressource disjonctive j , 0 sinon	matérialise l'utilisation d'une ressource disjonctive par une tâche
Arc "transition d'état"	----->	$\gamma_{k,r}^{\text{in}}, \gamma_{k,r}^{\text{out}}$: paramètres matérialisant la présence (=1) ou pas (=0) d'un arc « transition d'état » en entrée ou en sortie d'une tâche k et l'état r .	matérialise un changement d'état de la ressource r suite à l'exécution d'une tâche sur cette ressource

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



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

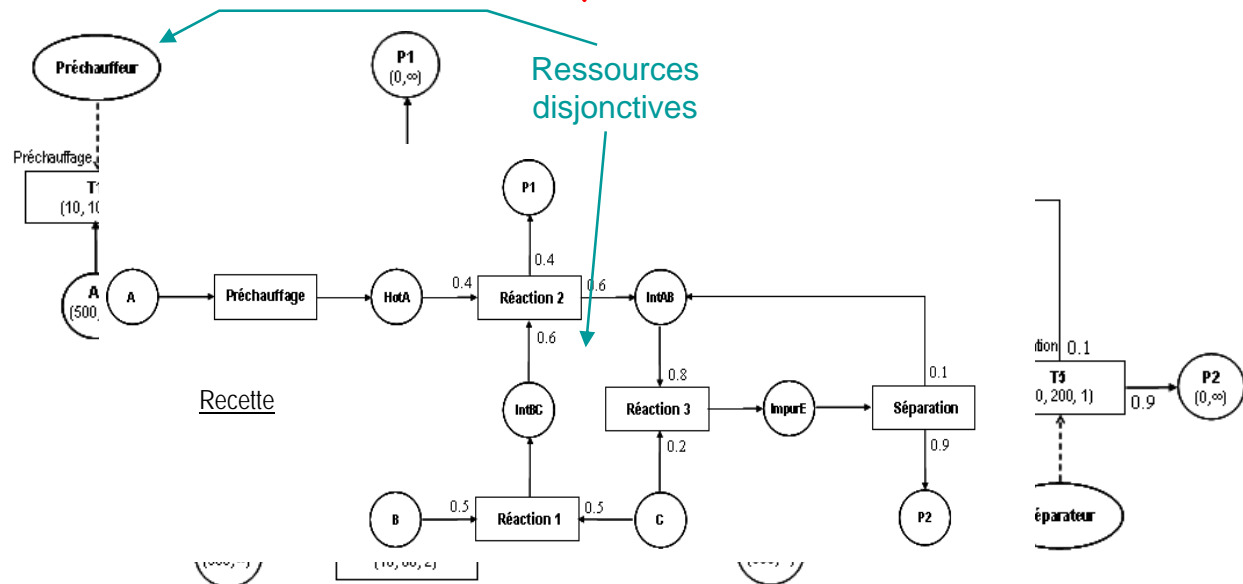
Cas d'appareils utilisables pour réaliser plusieurs opérations différentes



Topologie du procédé 1

Recette constituée de 5 opérations

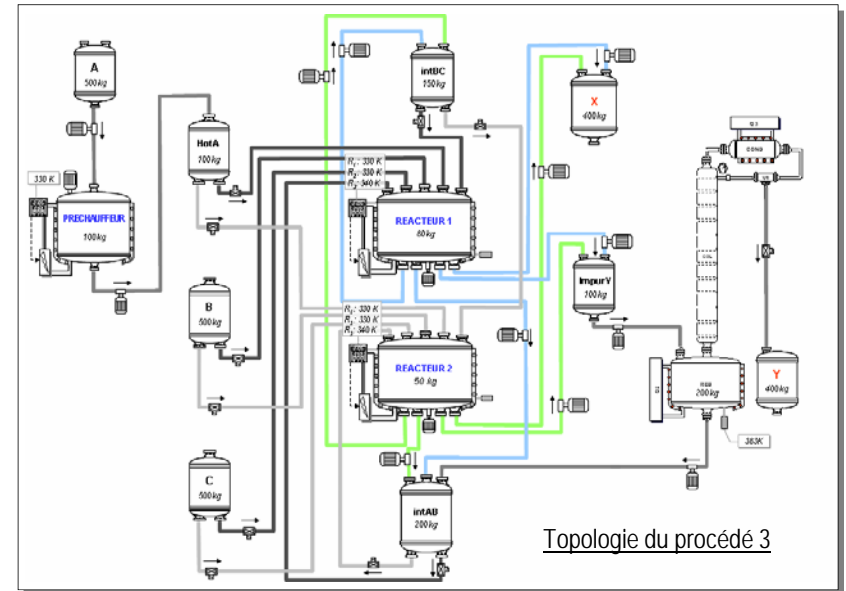
Réacteur 1 \Rightarrow réaction 1, 2 et 3



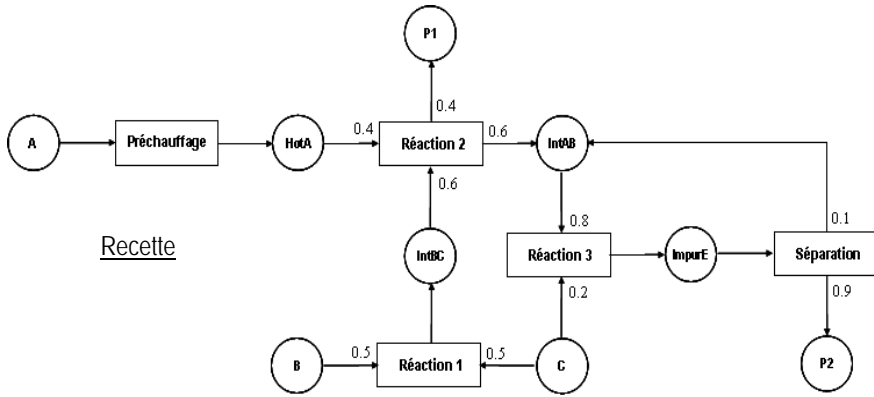
Recette

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

Cas d'opérations réalisables dans plusieurs appareils différents



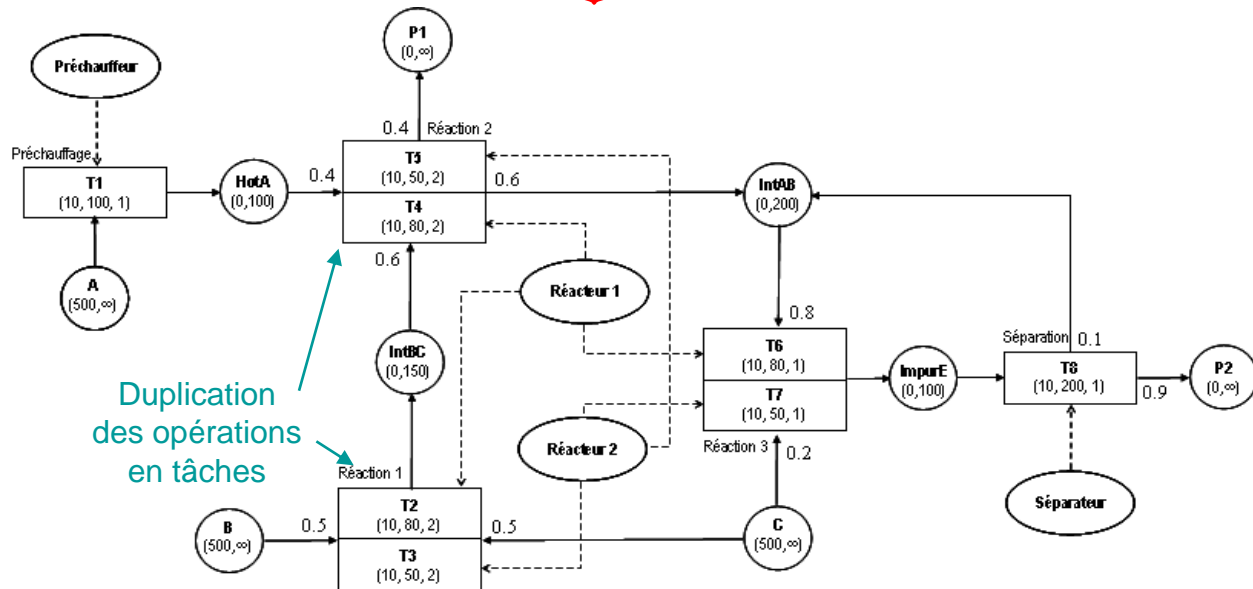
Topologie du procédé 3



Recette

Recette constituée de 5 opérations

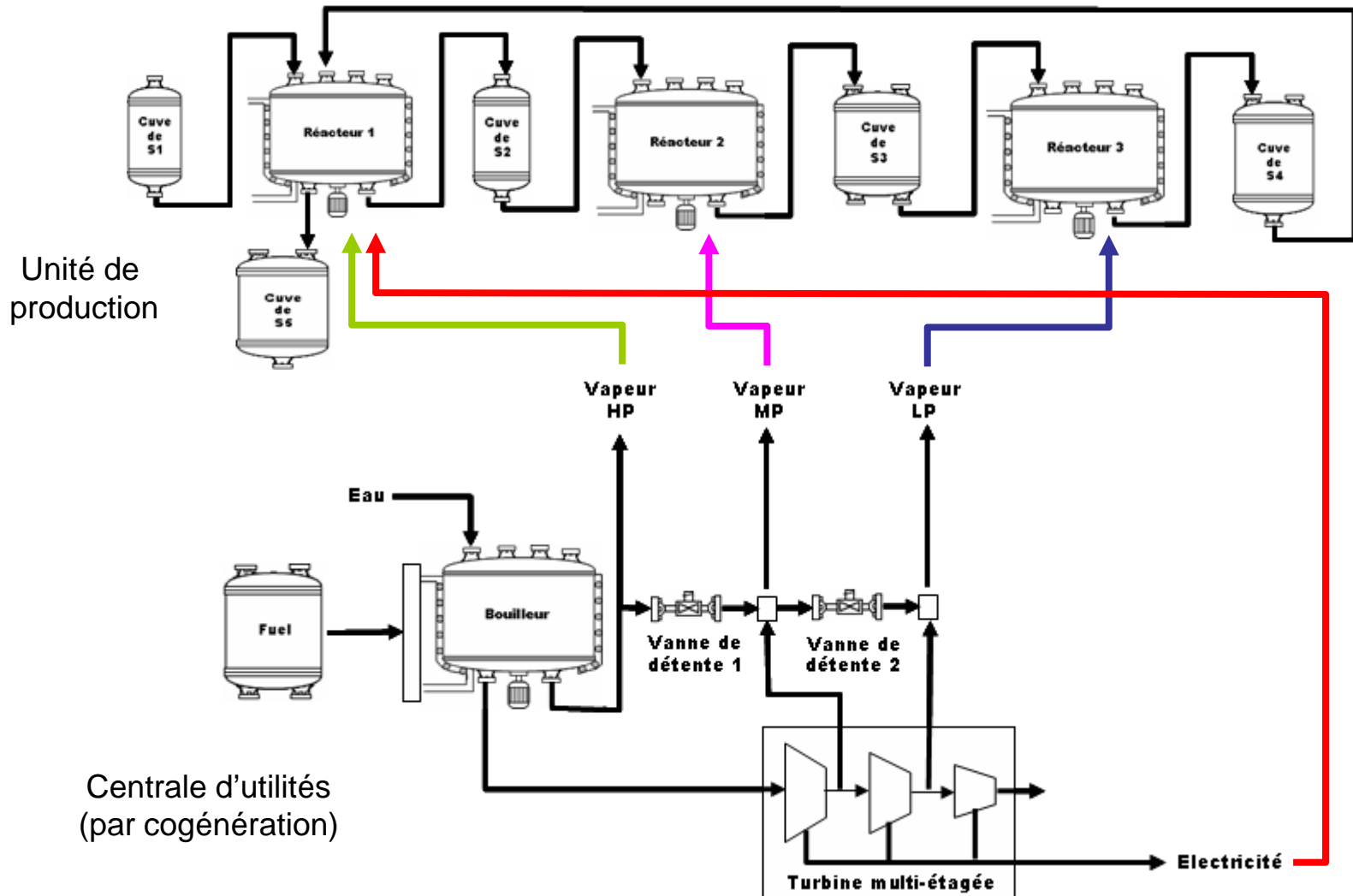
Réacteur 1 \Rightarrow réaction 1, 2 et 3 Réacteur 2 \Rightarrow réaction 1, 2 et 3



Duplication des opérations en tâches

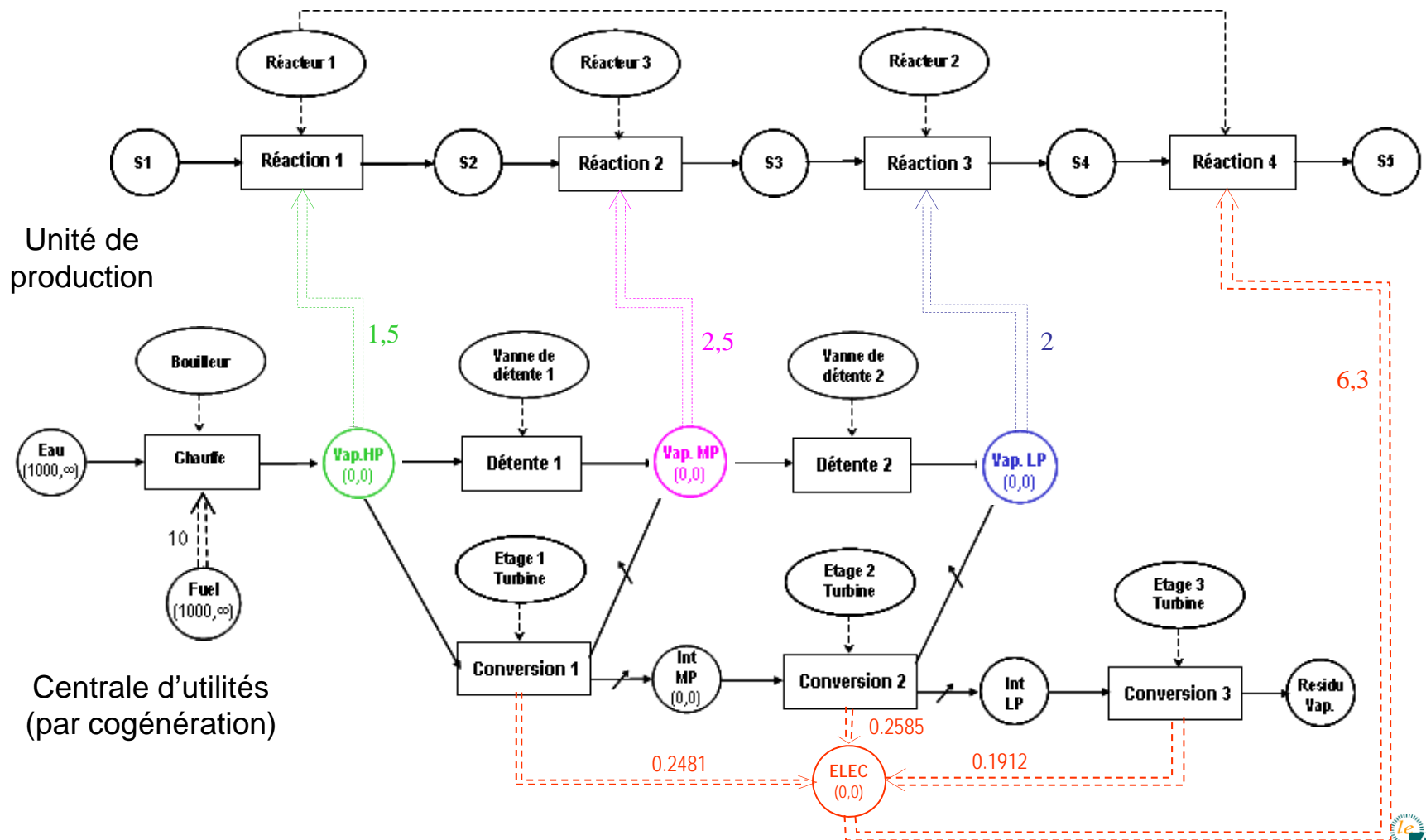
FORMALISME E.R.T.N. : Dualité des ressources

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



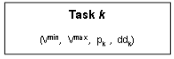

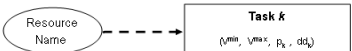
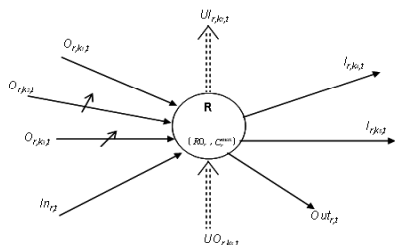
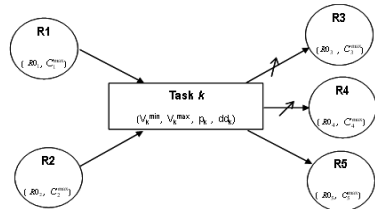
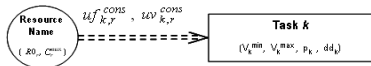
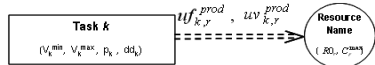

FORMALISME E.R.T.N. : Dualité des ressources

- 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 ASSOCIE

- 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		$W_{k,t} I_k^{\min} \leq B_{k,t} \leq W_{k,t} I_k^{\max} \quad \forall k \in K, \forall t \in T$ [Eq. IV-2]
Contrainte d'allocation des ressources		$\sum_{\substack{k \in K, t = t - p_k + 1 \\ t > 0}}^t W_{k,t} \leq 1 \quad \forall j \in J, \forall t \in T$ [Eq. IV-3]
Bilan matière pour chaque ressource		$R_{r,t} = R_{r,t-1} + \sum_{k \in K} O_{r,k,t} - dd_k - \sum_{k \in K} I_{r,k,t} + \sum_{i \in I} UO_{r,i,t} - UI_{r,i,t} + In_{r,t} - Out_{r,t} \quad \forall r \in R, \forall t \in T$ [Eq. IV-4]
		$R_{r,0} = R0_r \quad \forall r \in R, \forall t \in T$ [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]
		$I_{z,k,t} \leq (\rho_{k,z}^{cons} + \mu_{k,z}^{cons}) B_{k,t} \quad \forall k \in K, \forall r \in R_k^{cons}, \forall t \in T$ [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		$W_{k,t+1} = W_{k,t} + (1 - W_{k,t-1}) \quad \forall j \in J^{str}, \forall k \in K_j^{op}, \forall t \in 2, \dots, T-1$ [Eq. IV-17]
		$W_{k',t} \geq W_{k,t+1} - W_{k,t} \quad \forall j \in J^{str}, \forall k \in K^{op}, \forall k' \in K_j^{str}, \forall t \in 2, \dots, T-1$ [Eq. IV-18]
		$W_{k',t} \leq W_{k,t+1} \quad \forall j \in J^{str}, \forall k \in K^{op}, \forall k' \in K_j^{str}, \forall t \in 2, \dots, T-1$ [Eq. IV-19]

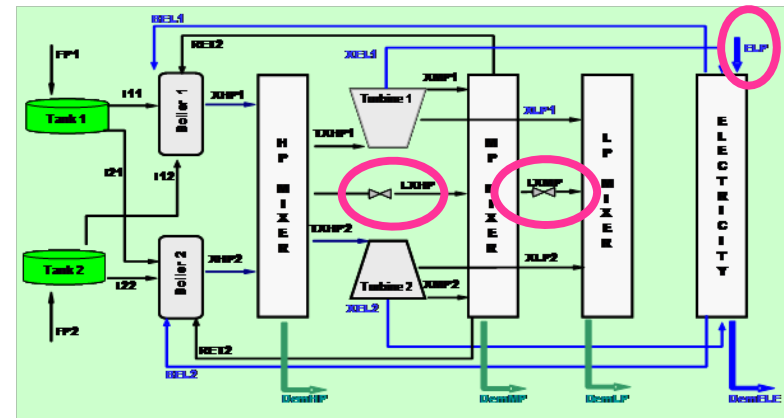
● Caractéristiques des systèmes de production considérés dans l'étude

■ 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*

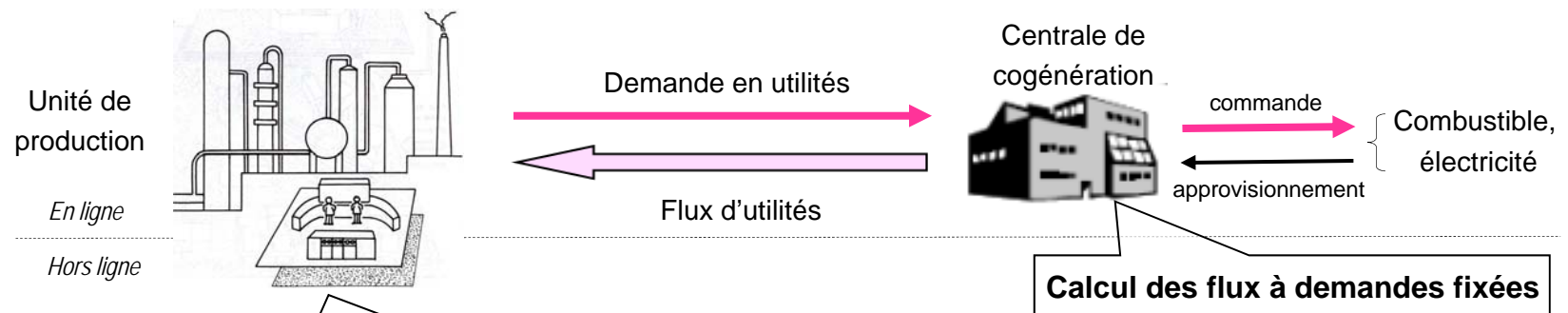


■ Critère :

- minimisation du retard et du coût énergétique

● 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*).



Etablissement des plans de fabrication en considérant l'unité productrice d'utilités de manière agrégée (capacité, coût ...)

Inconvénients :

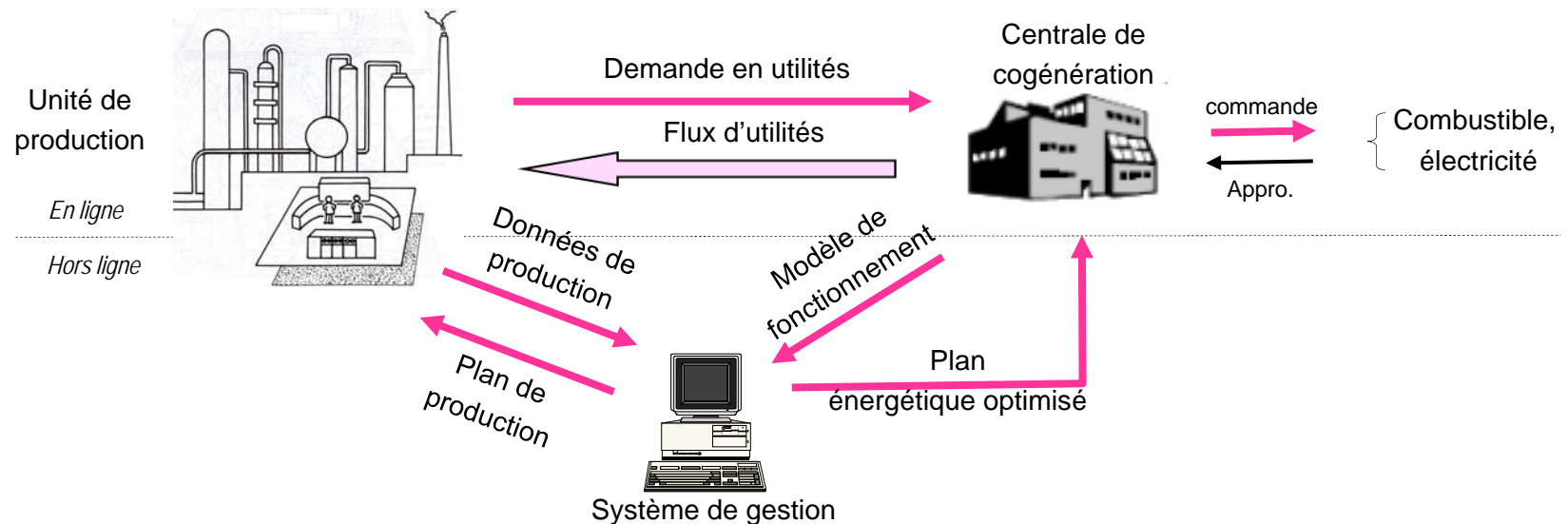
- ne permet pas de profiter pleinement des gains potentiels de la cogénération,
- peut conduire à l'infaisabilité du plan de production par une surcharge ponctuelle de la centrale d'utilité.

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 maitre/esclave*).

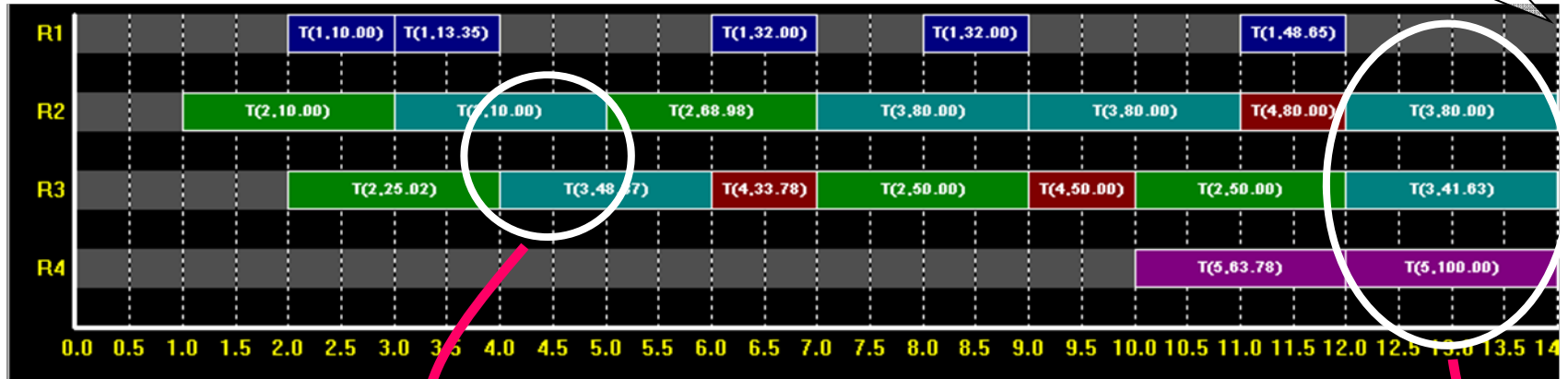
- **Organisation dans laquelle la conduite de la production prend en compte le fonctionnement de la centrale de cogénération** afin d'améliorer l'efficacité énergétique global du système (*approche intégrée*)



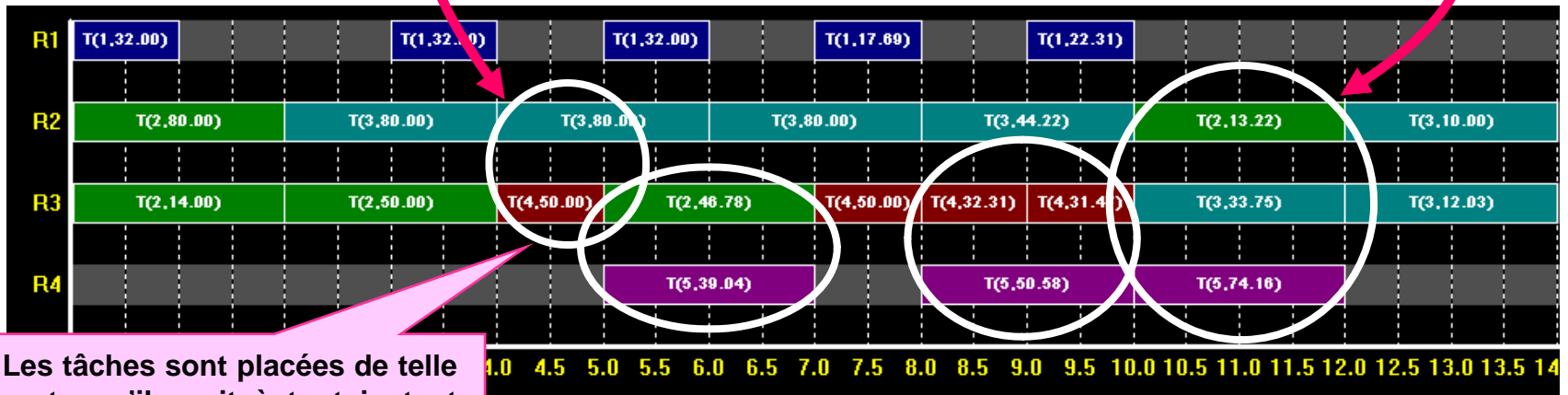
QUELQUES RESULTATS ...

Approche séquentielle

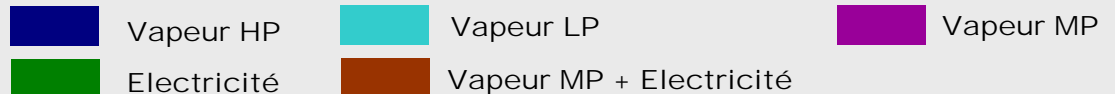
Date de livraison des 2 produits finis



Approche Intégrée



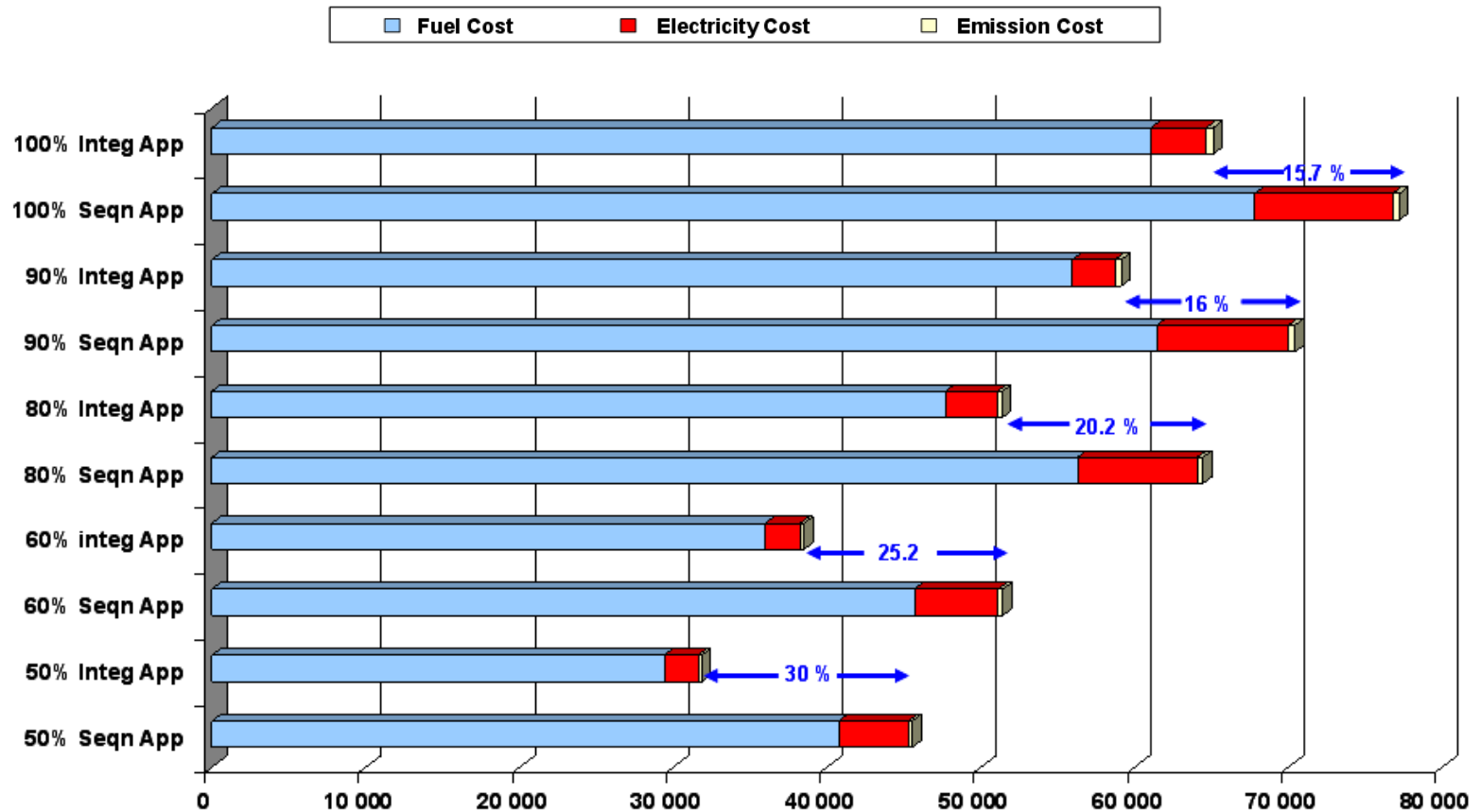
Les tâches sont placées de telle sorte qu'il y ait à tout instant une consommation simultanée en électricité et en vapeur



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

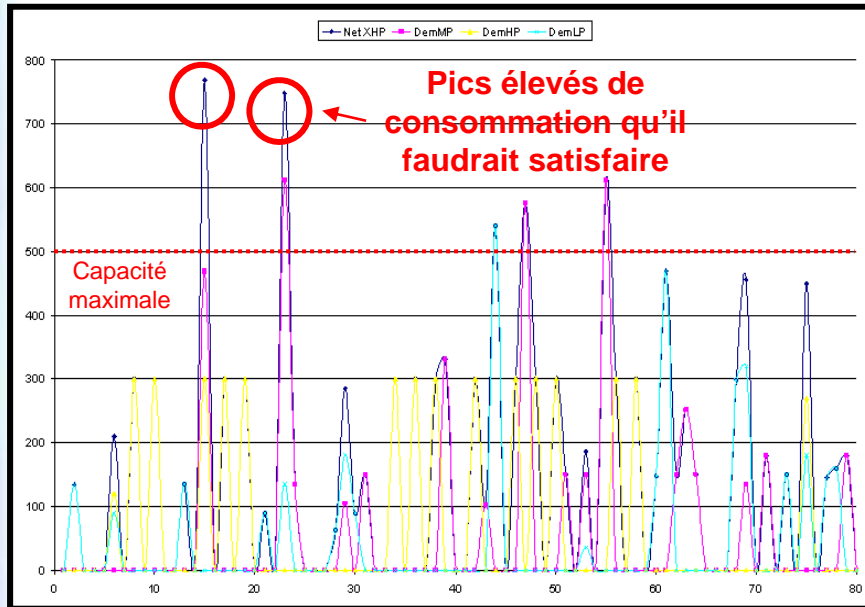


QUELQUES RESULTATS ...

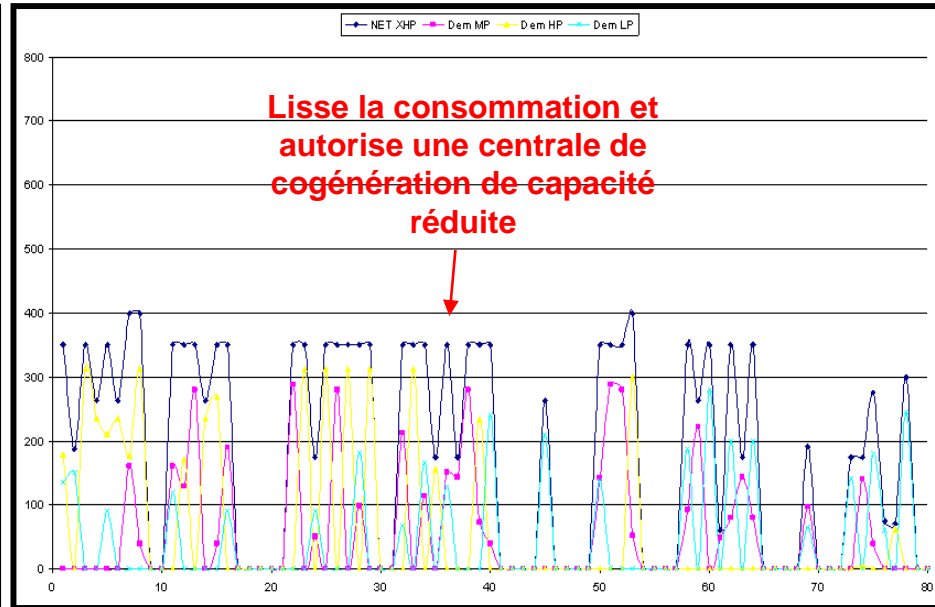
● Permet une utilisation plus efficace de la cogénération

- 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

Production Scientifique

- ▣ 4 publications dans des revues internationales
- ▣ 6 communications dans des congrès internationaux
- ▣ 4 communications dans des congrès nationaux

Encadrements

- ▣ 2 thèses soutenues
- ▣ 3 Projets Etudiants (3A ingénieur) - ENSIACET
- ▣ 2 master recherche

Communications aux GT de la SFGP : « Energie » et « IEP »

Projet GIMEP



Animation d'un groupe de travail « Benchmark Efficacité énergétique »

Participation de plusieurs partenaires :

- Industriels : VEOLIA, EDF, TECALIMAN, PROSIM, CTP
- Académique : EPFL, LGC

Développement d'un prototype logiciel

dédié à l'ordonnancement couplé de la production et des centrales de production d'utilités à destination des responsables de production

Dépôt d'un Projet ADEME

Optimisation de l'efficacité énergétique d'un procédé de production de PVC

Démarrage de 2 nouvelles thèses

Approche couplant analyse exergétique et analyse pincement dans un simulateur pour l'amélioration de l'efficacité énergétique des procédés

Prise en compte du concept d'intégration énergétique \Rightarrow récupération de l'énergie produite par les opérations de production elles-mêmes