

Les réacteurs chimiques

ECONOMIES D'ÉNERGIE DANS  
L'INDUSTRIE



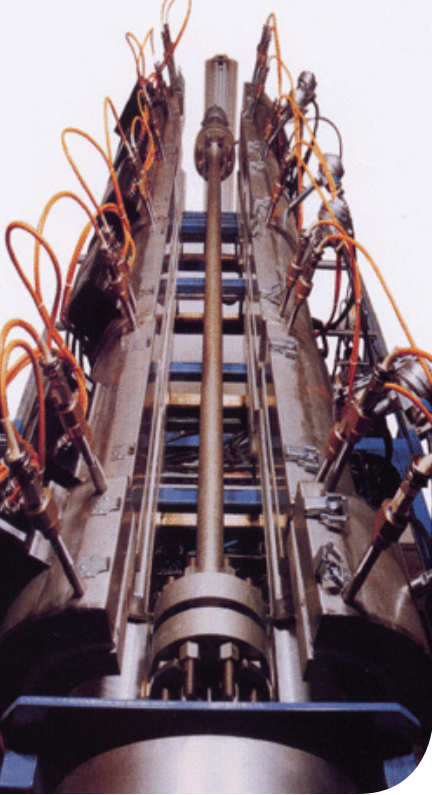
Wallonie



Service public  
de Wallonie



économisons  
l'énergie



Réacteur chimique.  
Source : Vinci technologies

## CE QUE VOUS DEVEZ SAVOIR SUR LES RÉACTEURS CHIMIQUES...

Les réacteurs chimiques occupent une place centrale dans les entreprises du secteur de la chimie et des sciences de la vie. Par la mise en présence de réactifs dans des conditions adaptées, ils permettent de combiner et de transformer par réaction(s) chimique(s) les matières premières en produits utiles. Leur rôle prépondérant est à la hauteur des besoins énergétiques nécessaires pour permettre aux réactions d'avoir effectivement lieu et ce, de manière efficace. Les importantes consommations d'électricité, de chaleur et de froid qui en découlent, représentent naturellement un poids important sur la facture énergétique et l'impact environnemental de chaque entreprise du secteur. Dès lors, il s'avère utile pour chacune d'entre elles de s'interroger sur les optimisations énergétiques éventuelles qui pourraient être mises en place au niveau de leurs réacteurs chimiques.

### Agir sur les variables opératoires

L'optimisation du rendement d'une réaction chimique est liée à deux facteurs :

- Un facteur cinétique dépendant principalement de la température, de la pression, des concentrations, du temps de séjour dans le réacteur et de l'usage éventuel d'un catalyseur
- Un facteur d'équilibre thermodynamique dépendant principalement de la température et de la pression (pour les réactions avec variation de volume)

Dans la plupart des cas, le procédé chimique mis en œuvre pour la synthèse d'un produit est figé de longue date par l'ingénierie de l'entreprise. Il semble donc a priori immuable et il est assez rare que l'on pense à remettre en cause les paramètres « process ». Toutefois, il reste généralement suffisamment de degrés de liberté à l'opérateur pour optimiser dans une certaine mesure les différentes variables opératoires dont la valeur peut avoir un impact substantiel sur le bilan énergétique de la réaction. Se poser la question de l'optimisation de ces paramètres, au démarrage mais aussi après plusieurs années de fonctionnement ou encore à l'occasion d'un nouvel investissement, peut donc toujours valoir la peine.

A titre d'exemple, l'augmentation de la vitesse d'une réaction permet généralement d'engendrer une réduction de la consommation d'énergie. Pour ce faire, une augmentation de la température peut dans la plupart des cas accroître cette vitesse (facteur cinétique) mais sera défavorable à l'équilibre chimique dans le cas d'une réaction exothermique (facteur d'équilibre thermodynamique) Les variations d'un paramètre peuvent donc avoir des conséquences opposées et c'est bien un problème d'optimisation qu'il s'agit de résoudre.

Le calcul des variables opératoires optimales tenant compte de la cinétique et des équilibres thermodynamiques des réactions est une étape cruciale et délicate. Le recours à des outils informatiques (simulation de procédé) se révèle, dès lors, fréquemment nécessaire.

## Optimiser le fonctionnement des réacteurs chimiques

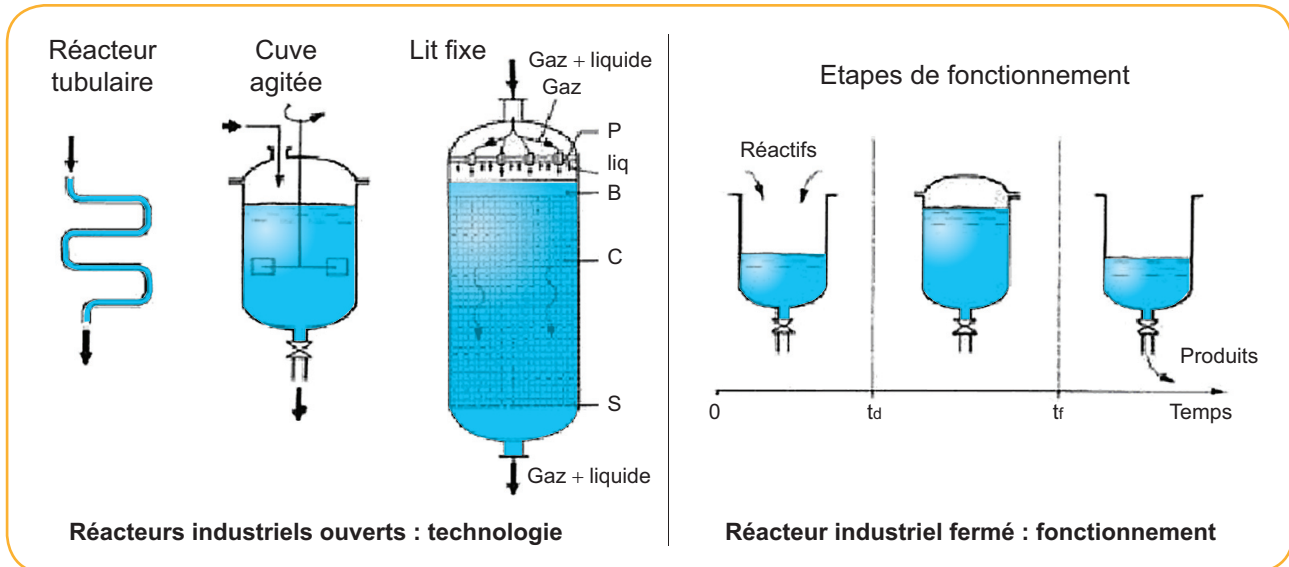
Une fois les conditions optimales de la réaction établies, il reste toute une série d'améliorations envisageables quant au fonctionnement du réacteur, ses équipements et ses échanges d'énergie avec le milieu extérieur...

Continu/Batch	Mode de fonctionnement continu ou par cycle
Dimensionnement	Volume et forme du (des) réacteur(s) chimique(s)
Chauffage/refroidissement	Conception et équipements (double enveloppe, serpentins, recirculation dans échangeurs, ...) Régulation des boucles
Récupération de chaleur	Préchauffage des intrants Valorisation de la chaleur perdue sur un autre process
Agitation	Système de mélange (dynamique ou statique) Variation de la vitesse des mélangeurs Méthode d'introduction des matières premières Suppression de l'agitation
Catalyse	Choix du catalyseur Dimensionnement du catalyseur
Equipements annexes	Filtration, ...
Calorifugeage	Isolation des parois

Agitation. Source : EKATO.



## Fonctionner en continu ou en batch ?



Source : P. TRAMBOUZE, Réacteurs Chimiques. Technologie. Techniques de l'Ingénieur, Génie des Procédés J4020

La production en réacteurs chimiques peut s'effectuer de manière cyclique par lots successifs de réactifs introduits et de produits extraits d'une cuve (Cycle : charge – réaction – vidange et nettoyage éventuel) ou de manière continue c'est-à-dire que l'entrée de réactifs et la sortie de produits s'effectuent en permanence. On parle respectivement de production en batch (système fermé) ou de production en continu (système ouvert). Bien que la production en batch offre davantage de souplesse dans la mesure où une même cuve peut être utilisée pour différents procédés, être mise à l'arrêt de manière plus ou moins prolongée (nettoyage, niveau de production variable dans le temps) ou encore être remplacée sans nécessiter l'arrêt complet de procédés en amont ou en aval, il convient de s'interroger sur la réelle nécessité et justification de son usage. En effet, une production en continu s'avère, dans la plupart des cas, énergétiquement et économiquement plus intéressante.

	Continu (système ouvert)	Batch (système fermé)
<b>Avantages</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Meilleur rendement énergétique</li> <li>Faible coût de fonctionnement</li> <li>Qualité finale constante</li> <li>Automatisation possible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Adapté aux solides, liquides, gaz et pâtes</li> <li>Souplesse d'utilisation</li> <li>Multifonctionnalité</li> </ul>
<b>Inconvénients</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Plus sensible à la fiabilité de chaque équipement</li> <li>Peu adapté aux solides et pâtes</li> <li>Manque de flexibilité (changement de produits)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rendement global faible</li> <li>Coût de fonctionnement élevé</li> <li>Qualité finale pouvant varier</li> <li>Surveillance accrue</li> </ul>

Réacteur chimique.  
Source : Pfaudler (De Jonghe)

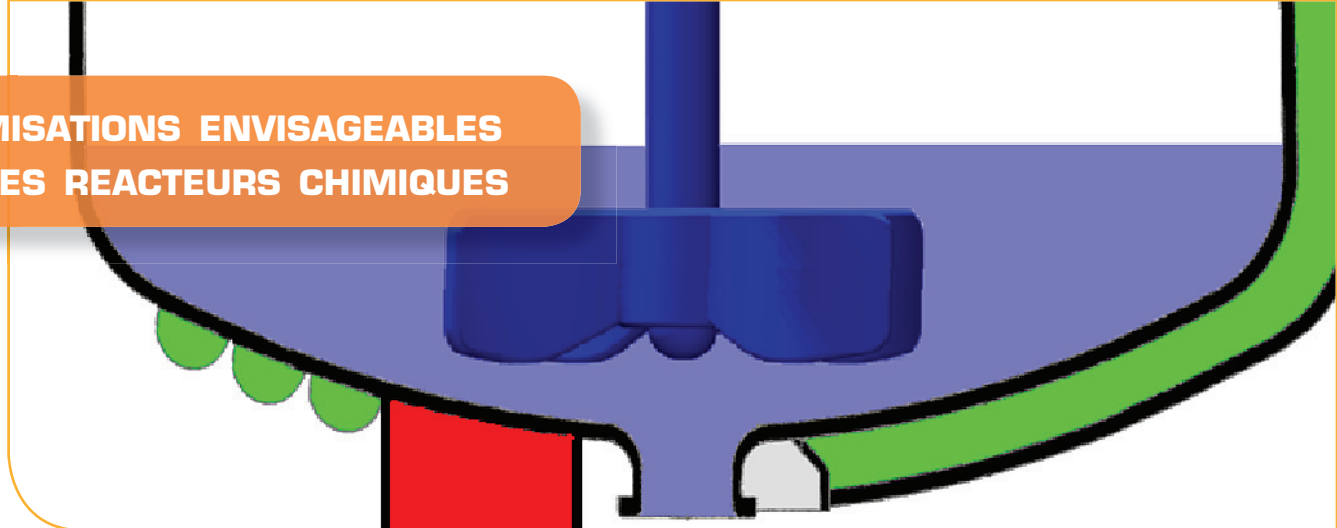


## Déterminer la taille, le design et le nombre de réacteurs

Il convient de remettre en question les dimensions de la ou des cuve(s) où a lieu la réaction. Celles-ci apparaissent en effet déterminantes pour le coefficient d'échange de chaleur, la facilité de mélange des réactifs et par conséquent, le temps de séjour dans le réacteur. Les consommations énergétiques sont in fine intimement liées au design ainsi qu'aux dimensions du réacteur. Les réacteurs peuvent en effet prendre des formes variées selon les phases en présence (réacteur torique, tubulaire, à bulles,...). Démultiplier un réacteur en plusieurs petits modules peut parfois s'avérer énergétiquement intéressant mais c'est bien entendu loin d'être toujours le cas et une étude est donc nécessaire. A titre d'illustration suivent ici les chiffres relatifs à un procédé étudié par Pfaudler.

		BE12500	BE6300	
		(1 unité)	(2 unités)	Gain
Coeff de transfert de chaleur	[W/m <sup>2</sup> K]	476	483	1,5%
Surface de transfert	[m <sup>2</sup> ]	25,3	33,2	31,2%
Ratio surface / volume	[m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	2,02	2,64	23,3%
Temps nécessaire par batch	[h]	2,44	1,87	23,4%
Investissement	[k€]	120	160	-33,3%

## OPTIMISATIONS ENVISAGEABLES SUR LES REACTEURS CHIMIQUES



Echange de chaleur par demi-tube enroulé (à gauche) ou double enveloppe classique (à droite). Source : Pfadler (De Jonghe)

### Réfléchir aux équipements de chauffage et refroidissement

Une surface suffisante pour permettre les échanges de chaleur entre le réacteur et le milieu extérieur sera nécessaire au bon déroulement de la réaction chimique. Celle-ci servira à fournir ou absorber les calories selon qu'il faille chauffer ou refroidir le milieu réactionnel. Différents appareillages aux performances énergétiques variables peuvent être mis en jeu :

- Double enveloppe constitutive de la paroi du réacteur
- Echangeur serpentin disposé à l'intérieur du réacteur
- Système de recirculation du milieu réactionnel en phase liquide (ou de condensation d'une phase vapeur) à travers un échangeur externe

#### Double enveloppe

La double enveloppe ou jaquette offre une simplicité de mise en œuvre mais la surface spécifique d'échange disponible diminue avec l'augmentation de la taille du réacteur. Pour des réacteurs cylindriques de rayon  $R$  et de hauteur  $h$ , la surface d'échange par unité de volume (hors face supérieure) est donnée par :

$$\frac{2\pi Rh + \pi R^2}{\pi R^2 h} = \frac{2}{R} + \frac{1}{h} \text{ [m}^2\text{/m}^3\text{]}$$

Pour des petits réacteurs (volume de quelques  $\text{m}^3$ ), la surface d'échange spécifique atteint typiquement des valeurs comprises entre 2 et 3  $\text{m}^2\text{/m}^3$ . Lorsque le volume du réacteur atteint quelques dizaines de mètres cubes, la surface d'échange spécifique diminue à une valeur plus proche des 1,5  $\text{m}^2\text{/m}^3$ . L'utilisation d'un demi-tube enroulé et soudé à l'extérieur du réacteur au lieu d'une simple double enveloppe permet d'augmenter la vitesse du fluide caloporteur et donc d'améliorer dans une certaine mesure le coefficient global de transfert de chaleur. Toutefois, le coefficient de transfert de chaleur d'un système double enveloppe reste typiquement assez faible (compris entre 50 et 400  $\text{W/m}^2\text{K}$ ).

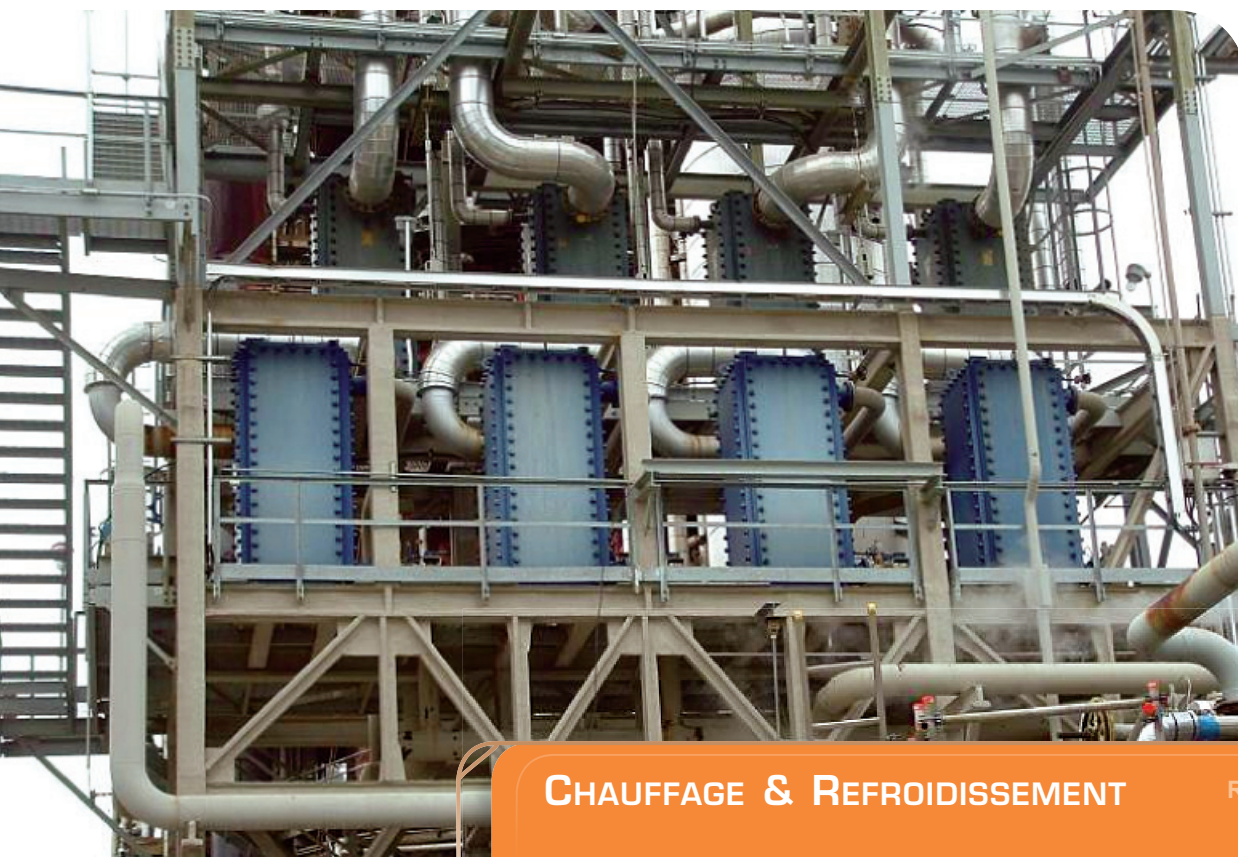
## Echangeur interne : serpentín

Pour augmenter le coefficient de transfert de chaleur, on peut avoir recours à un échangeur disposé à l'intérieur du réacteur qui permet d'atteindre des coefficients de transfert de chaleur proches des  $800 \text{ W/m}^2\text{K}$ . La surface de transfert de chaleur, bien qu'elle puisse être plus importante que pour la double enveloppe, demeure cependant limitée par la taille du réacteur. Par sa localisation interne au réacteur, ce système d'échange présente l'inconvénient d'éventuellement gêner l'agitation du milieu réactionnel ou d'être incompatible avec ce milieu.

## Echangeur sur Recirculation

Quant au système de recirculation du milieu réactionnel à travers un échangeur externe, il permet d'offrir de plus importantes surfaces d'échanges parfois indispensables au bon déroulement de certaines réactions fortement exothermiques. Cependant, une pompe de circulation supplémentaire est nécessaire, entraînant une consommation d'énergie parfois non négligeable si la pompe tourne en continu.

	Double enveloppe	Echangeur interne	Echangeur externe
<b>Avantages</b>	Facilité de mise en œuvre  Efficace pour les petits et très petits réacteurs ( $V < 10 \text{ m}^3$ )	Bon coefficient de transfert de chaleur	Bon coefficient de transfert de chaleur  Importante surface d'échange de chaleur
<b>Inconvénients</b>	Faible surface d'échange pour les grands réacteurs  Faible coefficient de transfert de chaleur	Surface d'échange limitée  Intégré au sein du milieu réactionnel	Uniquement adapté à des produits homogènes et suffisamment fluides



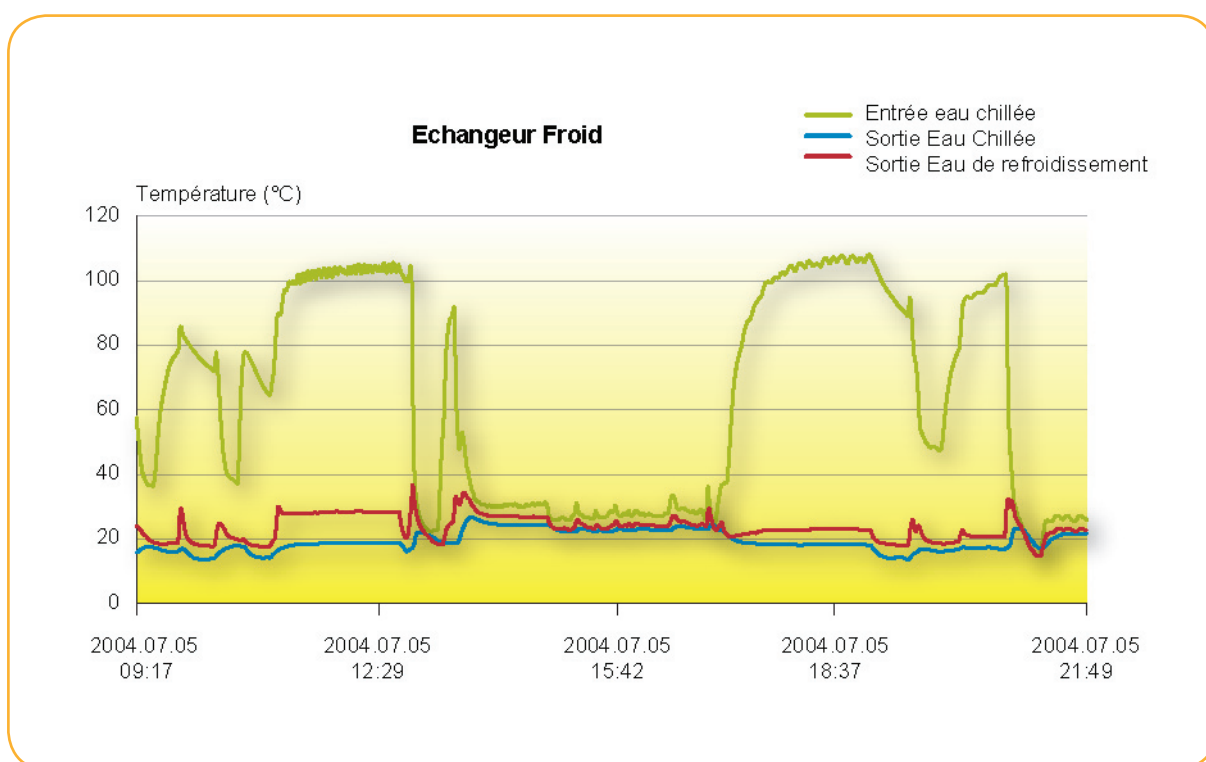
Echangeurs sur recirculation.  
Source : Alfalaval.

## Optimiser les boucles de chauffage et refroidissement

La conception et la régulation des boucles de chauffage et refroidissement des réacteurs méritent toute l'attention de l'ingénierie. En ce qui concerne la conception, il est énergétiquement toujours préférable de disposer d'une boucle de froid séparée de la boucle de chaud pour fournir ou absorber l'énergie thermique d'un réacteur. Pourtant, pour des questions de précision et de rapidité de contrôle de la température du milieu réactionnel, le recours à une boucle unique assurant le chauffage et le refroidissement est parfois privilégié. Le seul fluide qui y circule est alors chauffé ou refroidi suivant les besoins. En pratique, il arrive toutefois fréquemment que ce fluide soit refroidi et chauffé simultanément, ce qui constitue un non-sens énergétique. Le graphique illustre ce phénomène puisque le fluide thermique est envoyé au système de refroidissement (chiller) à une température pouvant atteindre plus de 100°C.

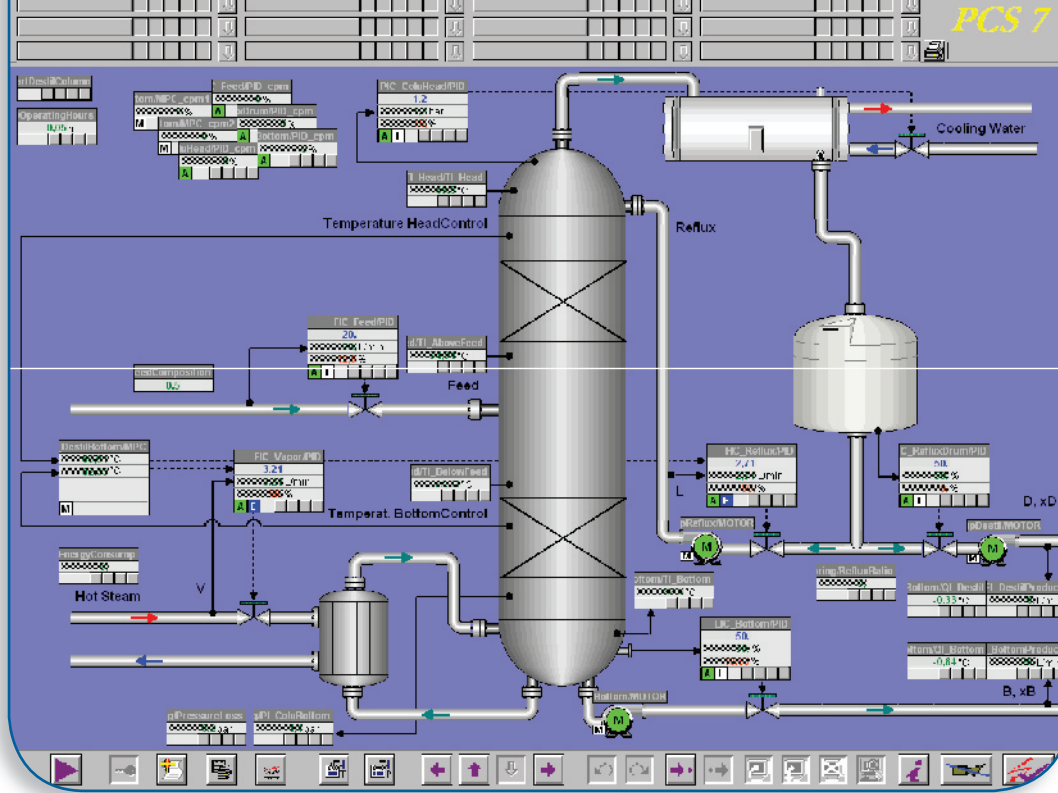
Il est donc plus que nécessaire d'analyser le fonctionnement de ses boucles de régulation, notamment grâce à des campagnes de mesure.

Une régulation optimisée du système de chauffage et refroidissement permet en effet d'engendrer des économies d'énergie. Des logiciels performants constituent une aide précieuse pour réaliser cette optimisation de la régulation.



Chauffage et refroidissement simultané du fluide thermique. Source : Siemens

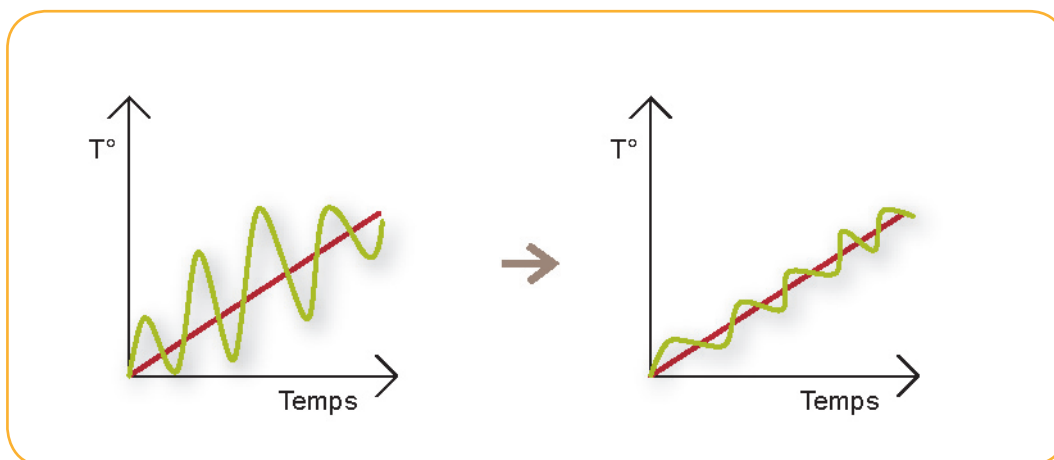




Logiciel de contrôle de procédé avancé. Source : Siemens

Ainsi, une régulation efficace peut permettre la mise en œuvre de deux boucles distinctes au lieu d'une boucle unique plus énergivore et ce, avec des degrés similaires de précision et de rapidité de contrôle. Pour ce faire, la régulation pourrait consister à adapter en continu les débits de ces boucles afin d'atteindre la température de consigne.

Dans tous les cas (1 ou 2 boucles), optimiser la régulation consistera notamment à lisser autant que possible la courbe de température du fluide thermique utilisé, c'est-à-dire limiter les écarts de température atteinte entre les périodes de chauffe et de refroidissement. L'illustration ci-dessous représente une courbe de chauffe du produit avec, en vert, la température de l'eau dans la double enveloppe. Le graphique de gauche représente la situation où, lorsque la température est trop haute, on refroidit l'eau de la boucle et, lorsque la température descend trop bas, on réchauffe. Le graphique de droite représente une situation plus favorable énergétiquement puisque les pics de chauffe et de refroidissement sont plus petits.



Régulation/lissage de la courbe de chauffe



Unité de production "Dow Wolff Cellulosics". Source : Alfa Laval

## Préchauffage des intrants chez Dow Wolff Cellulosics

Dow Wolff Cellulosics produit dans son usine belge de l'hydroxyéthyl cellulose, un polymère artificiel dérivé de la cellulose utilisé entre autres comme additif pour modifier la viscosité de certains produits comme les peintures et les colles.

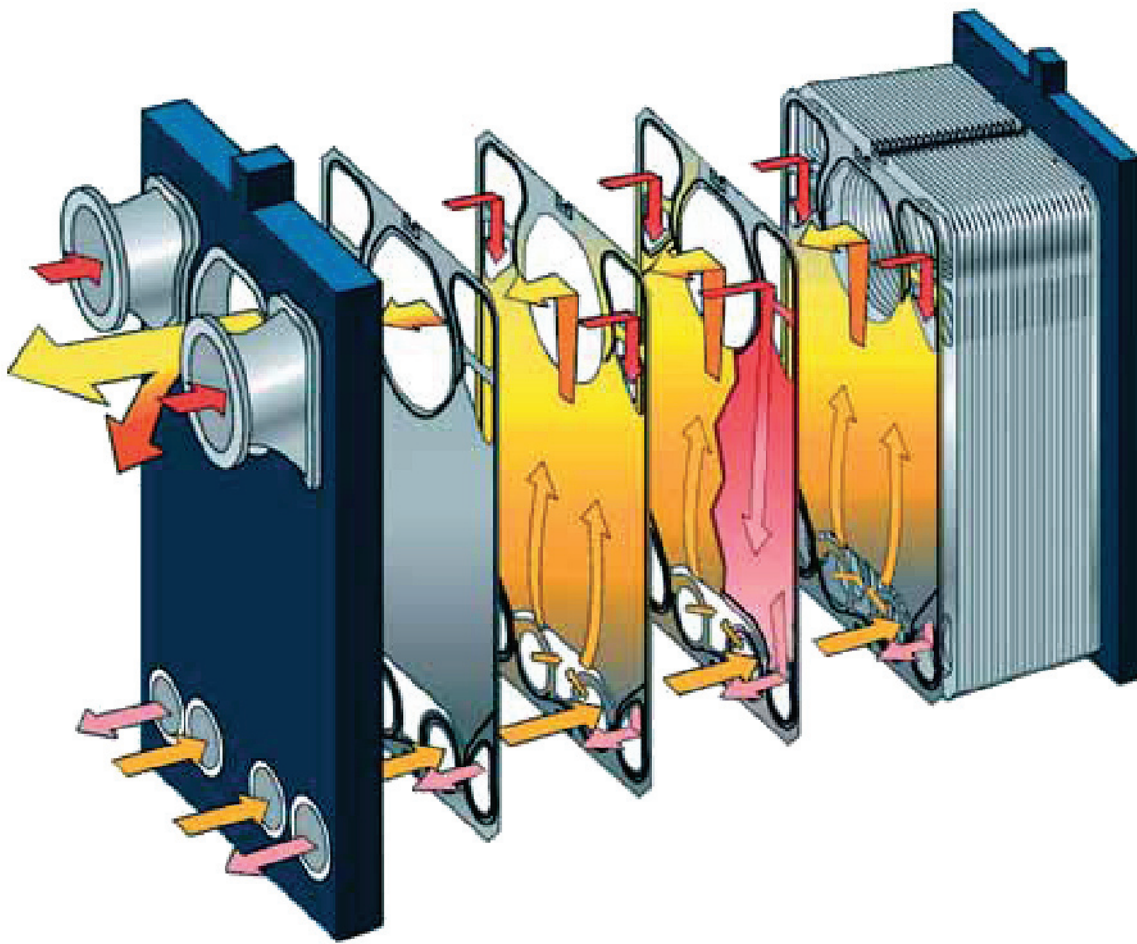
### Situation initiale des installations

La colonne de récupération du solvant utile à la réaction rejette la chaleur latente de la vapeur au sommet de la tour. A cet endroit, la vapeur se condense grâce à des ventilateurs alimentés en air extérieur frais.

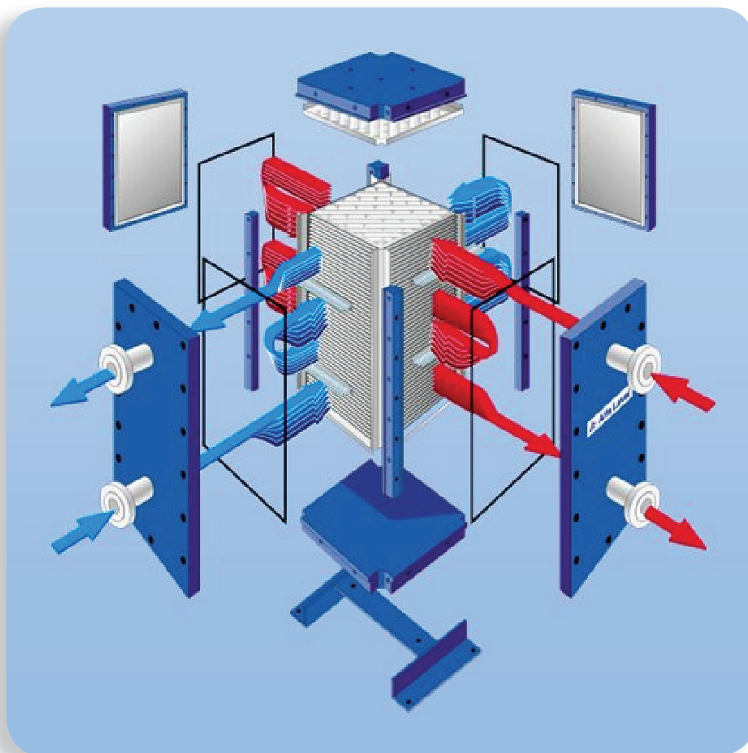
### Optimisation réalisée

L'installation par Alfa Laval d'un échangeur à plaques performant comme condenseur a permis de récupérer l'énergie libérée par le changement de phase de la vapeur pour chauffer les intrants de la même colonne de récupération du solvant. La circulation à contre-courant dans l'échangeur permet au liquide d'entrer dans la tour à une température d'autant plus importante, entraînant l'économie d'une puissance thermique équivalente à 780 kW. Les émissions de 1 250 tonnes de CO<sub>2</sub> sont ainsi évitées annuellement !

Economie d'énergie réalisée	22 400	GJ / an
Temps de fonctionnement annuel de l'installation	8 000	Heures/an
Puissance thermique équivalente évitée	780	kW
Emissions de CO <sub>2</sub> évitées annuellement	1 250	Tonnes/an



Source : Alfa Laval



Condenseur à plaques Compabloc. Source : Alfa Laval

### Pourquoi cette récupération de chaleur est-elle intéressante ?

Il s'agit d'une récupération interne à un même process : croisement des flux entrée froide et sortie chaude.

Au niveau des réacteurs chimiques, il est souvent intéressant d'étudier la récupération de chaleur des fluides chauds en sortie pour le préchauffage des intrants.



Source : Prayon

## Optimisation de la récupération de chaleur de production d'acide sulfurique chez Prayon

### Description du projet

La société Prayon, spécialisée dans la chimie des phosphates, dispose d'un site de production en Wallonie situé à Engis. La fabrication des produits phosphatés nécessite l'utilisation d'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ). C'est pourquoi Prayon vient d'inaugurer une installation de production de 1000 tonnes/jour d'acide sulfurique conçue selon le procédé MECS par le bureau d'étude SNC-Lavalin basé à Bruxelles. Ce procédé permet en outre de maximiser la récupération de chaleur du procédé sous forme d'énergie électrique et de vapeur. Ceci permet à Prayon de diminuer substantiellement l'utilisation de chaudières à combustibles fossiles et réduire de 43% ses émissions de gaz à effet de serre ! Cependant, pour des raisons propres au site de Prayon, il a fallu modifier une partie du procédé pour continuer à optimiser cette récupération de chaleur.

### Description du procédé MECS classique

Le principe du procédé est le suivant. Le soufre est brûlé dans un four et les gaz de combustion sont traités dans un convertisseur catalytique qui transforme le  $SO_2$  en  $SO_3$ . La chaleur dégagée par la combustion et par la conversion catalytique très exothermique est utilisée pour produire de la vapeur à haute pression qui alimente un turbo-alternateur de 15 MW. Les gaz riches en  $SO_3$  sont ensuite traités dans une tour d'absorption dans laquelle circule une solution d'acide sulfurique concentré et d'une faible quantité d'eau avec laquelle le trioxyde de soufre va réagir pour former de l'acide sulfurique supplémentaire. Prayon a opté pour le système HRS<sup>TM</sup> (Heat Recovery System<sup>TM</sup>, voir schéma ci-dessous) de MECS qui permet là aussi de capter la chaleur de la réaction exothermique de formation de  $H_2SO_4$ . D'abord, l'acide sulfurique circulant à plus de 200°C cède une partie de sa chaleur dans une chaudière produisant de la vapeur à 8 bars. Ensuite, l'acide sulfurique soutiré est refroidi jusqu'à 70°C par un récupérateur qui réchauffe l'eau d'alimentation de la chaudière suivi d'un préchauffeur qui préchauffe l'eau d'appoint de la bache dégazante (qui alimente également le circuit haute pression de la turbine). Enfin, un refroidissement final à l'eau permet d'atteindre la température souhaitée pour le stockage et l'utilisation de l'acide.

### Description de l'optimisation

L'utilisation rationnelle de l'énergie étant au centre des priorités chez Prayon, l'eau servant d'appoint était déjà préchauffée via une récupération de chaleur à un autre endroit du site. Il a donc fallu modifier le système HRS<sup>TM</sup> afin de valoriser la chaleur du processus de refroidissement de l'acide sulfurique d'une autre manière (voir partie en bleu du schéma).

Pour ce faire, le préchauffeur est en fait remplacé par deux étages de valorisation de la chaleur:

- Une boucle de flashing où de l'eau sous pression est chauffée à 130°C par l'acide sulfurique avant d'être détendue, produisant ainsi de la vapeur basse pression injectée dans les gaz juste en amont de la tour d'absorption HRS<sup>TM</sup>. Cet apport supplémentaire d'énergie thermique se retrouve in fine dans l'acide sulfurique et est récupéré au niveau de la chaudière.

- Un échangeur permettant de réchauffer les condensats issus du turbo-alternateur et qui remplace le préchauffeur de l'eau d'appoint du circuit vapeur.

Sans cette optimisation, la température de l'acide sulfurique à la sortie du système HRS™ aurait dépassé les 170°C au lieu de 70°C et aurait nécessité des tours de refroidissement de grande dimension et le pompage d'un important débit d'eau entraînant de lourdes consommations énergétiques pour finalement « réchauffer l'atmosphère ».

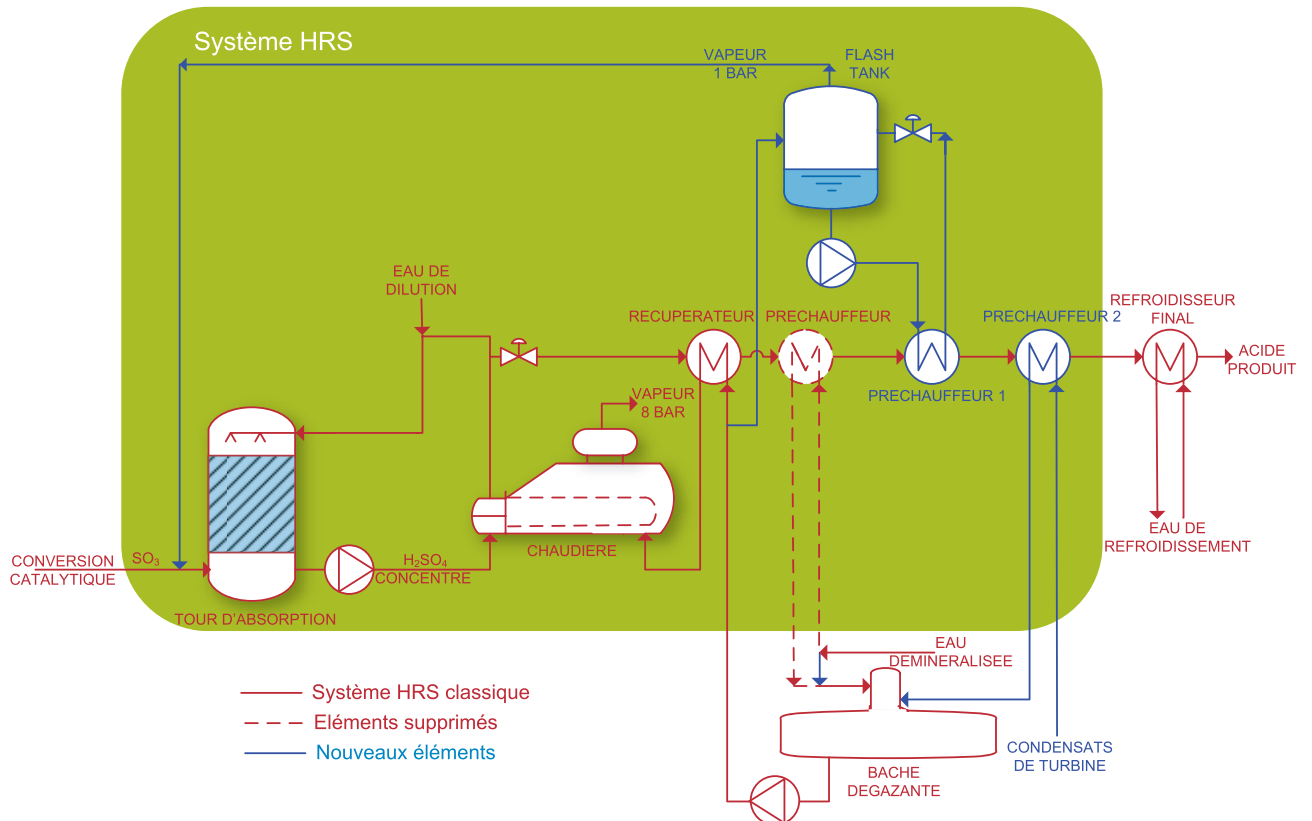
### L'optimisation en chiffres

Augmentation de la capacité de la chaudière	2,1	t/h
Economie de puissance des tours de refroidissement	jusqu'à 4,8	MWth
Economie de débit d'eau de tour	jusqu'à 415	m³/h

### A noter :

Il est possible d'optimiser des process de production existants pour récupérer de la chaleur. Certains bureaux d'études peuvent vous aider dans cette réflexion.

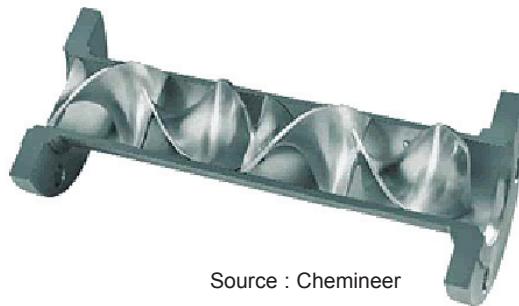
Système HRSTM



## Réfléchir à une agitation moins énergivore

Il existe différentes sortes d'agitateurs pouvant servir au mélange des réactifs, catalyseurs et autres additifs. Ces différents agitateurs ont des consommations spécifiques d'énergie pouvant être très variables. Le bon choix du système de mélange du réacteur chimique peut donc conduire à de substantielles économies énergétiques et financières. La question du type d'agitation ne doit pas seulement se poser à l'installation d'un nouveau réacteur, mais peut également être étudiée pour un réacteur en fonctionnement depuis plusieurs années.

### Mélangeur statique



Source : Chemineer

### Agitateur rotatif

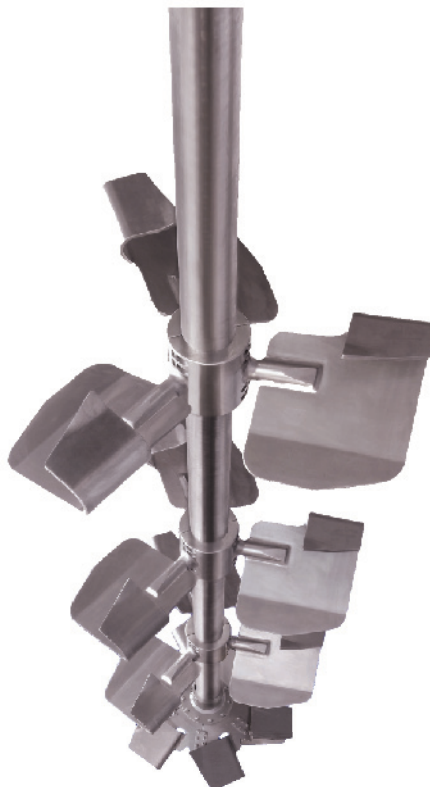
#### Hélice

(mouvement induit  
de type axial)



#### Turbine

(mouvement induit  
de type radial)



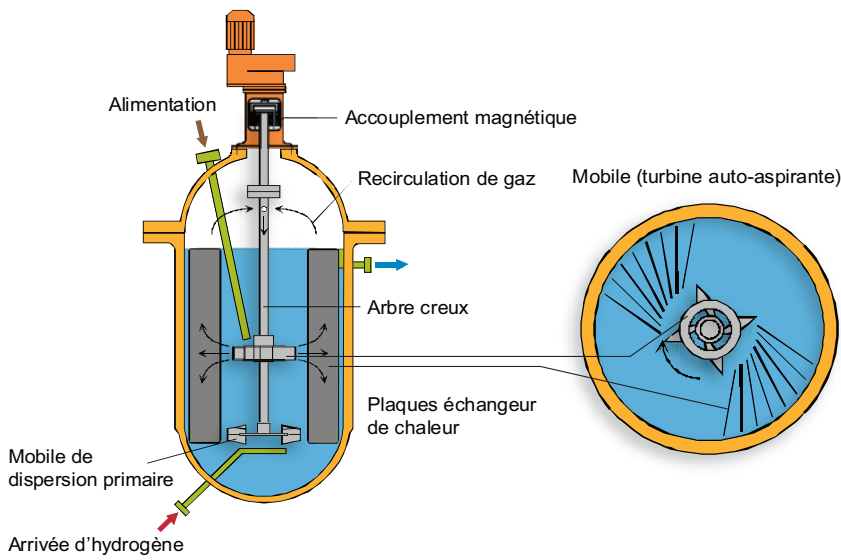
#### Ancre

(mouvement induit  
de type périphérique)

Peut être optimisée pour induire également  
un autre type de mouvement



Source : EKATO

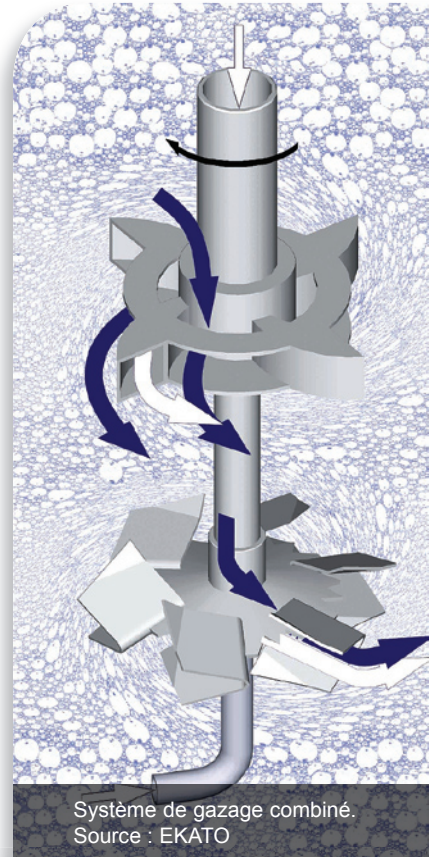


Réacteur d'hydrogénation avec turbine auto-aspirante. Source : EKATO

## Technique d'agitation optimisée dans un réacteur d'hydrogénation

Lors d'un processus de réaction entre une phase gazeuse et une phase liquide, le réactant gazeux ne peut, dans la plupart des cas, pas être immédiatement totalement transformé chimiquement de telle sorte que l'excès de gaz s'accumule en haut du réacteur. S'il n'est pas éliminé, la pression dans le réacteur augmente et empêche l'admission de gaz frais. S'il s'agit de gaz purs comme l'oxygène, l'hydrogène, l'acétylène, le monoxyde de carbone ou le dioxyde de carbone, il vaut mieux qu'ils soient totalement consommés, récupérés ou traités parce que ces gaz sont chers et/ou ne peuvent pas être lâchés dans l'atmosphère sans traitement onéreux. La récupération des gaz sous forme liquide pourrait se faire via un compresseur séparé mais cela coûterait cher à faire fonctionner et nécessiterait des coûts d'investissement supplémentaires. Une alternative est de faire recirculer le gaz au moyen d'une turbine d'aération auto-aspirante à arbre d'agitation creux. Le gaz non spontanément dissous est constamment remis en circulation à partir de la partie supérieure de la cuve par l'intermédiaire d'une turbine auto-aspirante (qui fait aussi office d'agitateur) jusque loin en dessous de la surface du liquide.

A titre d'illustration, dans un réacteur d'hydrogénation de 20 m<sup>3</sup> où sont fabriqués des additifs avec un rendement de 8 tonnes par lot, le système de gazage combiné alliant un agitateur performant à une turbine auto-aspirante représente une solution compacte pour réaliser une agitation de qualité et de conséquentes économies d'énergie. En effet, ce système a permis de réduire le temps de réaction de 3,5 à 2 heures et par conséquent le temps de traitement du lot de 5,5 à 4 heures. Au lieu de 1 450, ce sont désormais 2 000 lots par an qui peuvent être fabriqués. Il convient de souligner qu'une telle augmentation des performances est possible avec une consommation d'énergie totale inchangée, ce qui signifie une consommation d'énergie spécifique par tonne de produits réduite de plus de 25%.



Système de gazage combiné. Source : EKATO

### Avez-vous déjà pensé à optimiser la technologie de mélange ?

Utiliser une technologie d'agitation plus performante peut vous aider à réduire la consommation énergétique de votre process.

Il existe en effet des agitateurs dont le design mieux adapté permet un mélange plus efficace énergétiquement ou dont le mouvement rotatif est combiné à un système de pompage, conduisant à un meilleur rendement global de l'installation.

	AVANT optimisation	APRES optimisation
Temps de réaction	3,5 heures	2 heures
Temps de traitement du lot	5,5 heures	4 heures
Nombre de lots traités	1 450 lots/an	2 000 lots/an
Consommation d'énergie totale		Inchangée
Economie d'énergie relative		-27,5%

## Mélange à faible vitesse et nouvelle méthode de chargement des fillers chez Imperbel

Imperbel à Perwez dispose de deux lignes de production principales pour la fabrication de membranes d'étanchéité bitumineuses pour toitures plates et ouvrages d'art, principalement commercialisés sous le nom DERBIGUM.

### Avez-vous déjà remis en cause la vitesse de mélange ?

Il est souvent possible de réduire la vitesse de mélange de manière continue ou périodique, tout en conservant l'agitateur existant. L'investissement dans un système d'agitation optimisé pour fonctionner à vitesse réduite peut également s'avérer intéressant.

Envisager l'installation d'un variateur de vitesse sur l'agitation de votre réacteur chimique peut également vous permettre de réduire la consommation énergétique de votre process.

### Situation initiale des installations

Les mélanges de bitume-polymère utilisés dans la confection des membranes d'étanchéité sont réalisés dans des mélangeurs verticaux d'une capacité de 8 tonnes. Chaque mélange nécessite 311 kWh électriques pour assurer une dispersion adéquate des matières premières, soit une consommation spécifique de 38,9 kWh/tonne. L'ensemble des polymères utilisés pour le mélange, auparavant utilisés sous forme de blocs de plusieurs dizaines de kg, sont aujourd'hui tous broyés en morceaux de taille de l'ordre du centimètre. Cette évolution permet d'envisager une amélioration de la technique de mélange.

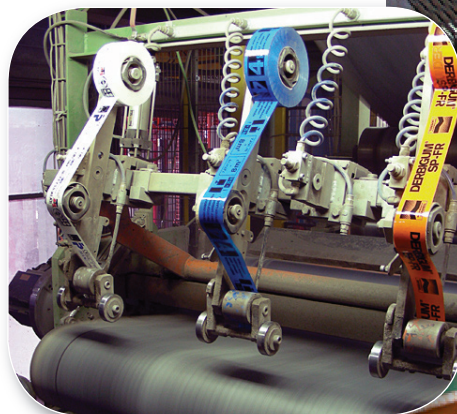
### Optimisations des installations réalisées en 2006

#### Diminution de la vitesse de mélange

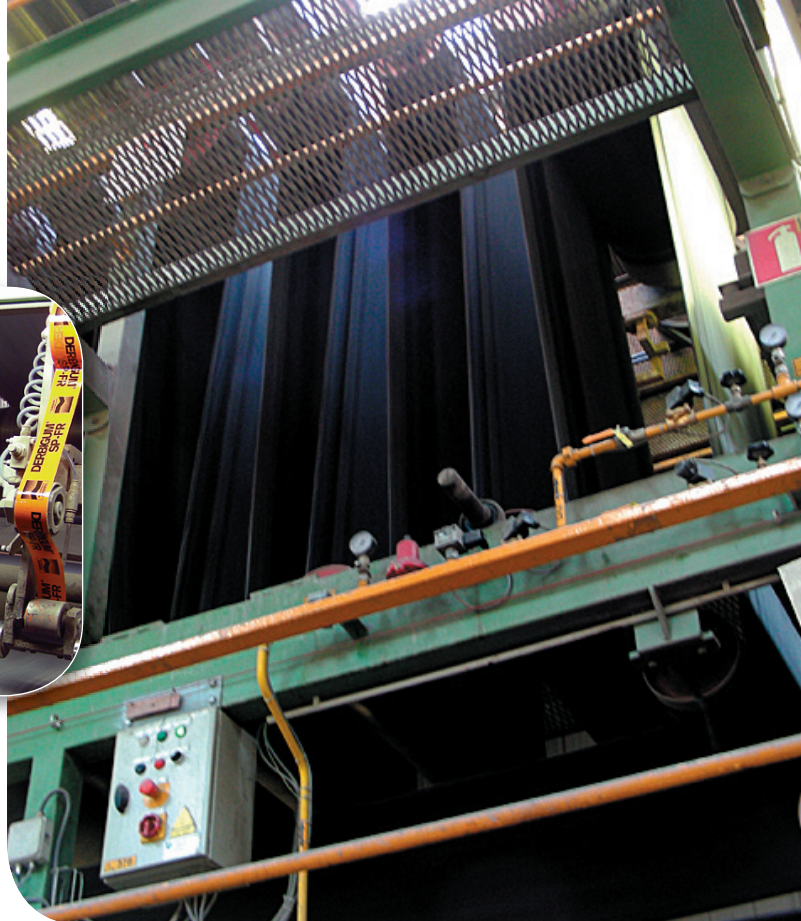
L'investissement dans 3 nouveaux mélangeurs de 16 tonnes optimisés pour une réalisation du mélange à basse vitesse permet de diminuer les consommations énergétiques de manière drastique. En effet, la vitesse de mélange, initialement de 400 tours/minute, est réduite à seulement 18 tours/minute tout en conservant la qualité de la dispersion grâce à un agitateur spécialement étudié, ce qui conduit à une consommation de 150 kWh électriques pour 16 tonnes de mélange, soit une consommation unitaire de 9,4 kWh/tonne au lieu des 38,9 kWh/tonne nécessaires précédemment.

Vitesse de mélange initiale	400	Tours/min
Vitesse de mélange des nouvelles installations	18	Tours/min
Consommation électrique unitaire AVANT modification	38,9	kWh/tonne
Consommation électrique unitaire APRES modification	9,4	kWh/tonne
Consommation électrique unitaire évitée	29,5	kWh/tonne
Quantité de bitume-polymère produite par les nouveaux mélangeurs	12 600	Tonnes/an
Quantité d'électricité économisée	372 000	kWh/an
Gain annuel sur la facture électrique (hypothèse : 75 €/MWhé)	28 000	€/an
Coût global de l'installation	312 000	€
Prime de la Région Wallonne	50 000	€
Investissement net	262 000	€
Temps de retour sur investissement	9,4	ans





Source : Derbigum "greennovator"



### Nouvelle méthode de chargement des fillers

L'installation de « vis à craie » sur les mélangeurs permet d'améliorer considérablement la méthode de chargement des fillers dans les mélanges. Ces matières au pouvoir rigidifiant ne seront plus introduites par gravité dans les cuves mais au moyen d'une vis directement plongée dans la phase liquide du mélange. Outre la suppression de la formation de poussières qui engendre des économies sur la mise à la décharge des déchets, cette nouvelle technique conduit à une réduction de la durée d'agitation de 15 minutes par mélange de 8 tonnes.

Quantité produite par les mélangeurs concernés	22 000	Tonnes/an
Réduction unitaire de la durée de mélange	1,875	Min/tonne
Réduction globale de la durée de mélange	690	Heures/an
Puissance moyenne absorbée par un ancien mélangeur	68	kW
Quantité d'électricité économisée	46 900	kWh/an
Gain annuel sur la facture électrique (hypothèse : 75€/MWhé)	3 520	€/an
Gain annuel sur la mise à la décharge des déchets	1 500	€/an
Coût global de l'installation	266 000	€
Prime de la Région Wallonne	31 000	€
Investissement net	235 000	€

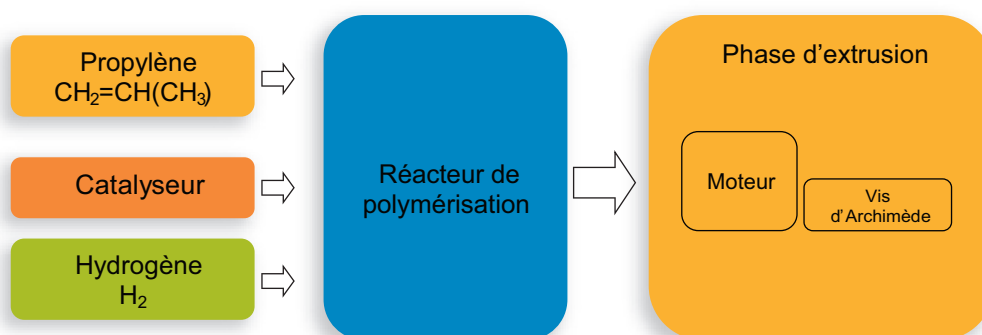
Le calcul d'un temps de retour pour cet investissement est peu pertinent dans la mesure où son objectif principal consistait à éliminer les poussières dans les cheminées d'aspiration des fumées des mélangeurs.



Détail des installations du site "Total Petrochemicals" à Feluy.  
Source : planete-energies

## Changement de catalyseur dans la réaction de polymérisation pour la fabrication de polypropylène (-CH<sub>2</sub>-CH(CH<sub>3</sub>)-)<sub>n</sub> chez Total Petrochemicals

Le site de Total Petrochemicals à Feluy est l'un des plus grands centres de production de polypropylène au monde. La matière première nécessaire, le propylène, arrive directement par pipeline depuis la raffinerie d'Anvers. Plus d'une centaine de sortes différentes de polypropylène représentent une production annuelle d'environ 900 000 tonnes.



Phases de production du PolyPropylène (PP)

### Votre catalyseur est-il le plus adapté?

La plupart des réactions nécessitent un catalyseur (homogène ou hétérogène) pour se dérouler avec un rendement acceptable industriellement, dans un volume et un temps limités. Le choix non seulement du type mais également de la quantité et de la forme du catalyseur est primordial dans le bilan énergétique du réacteur.

### Principe de la polymérisation du propylène (PP)

La polymérisation est le procédé chimique permettant la formation de macromolécules généralement organiques obtenues par l'enchaînement covalent d'un grand nombre de motifs monomères identiques ou différents. Dans le cas du polypropylène, ces chaînes de molécules sont obtenues par cassure de la double liaison C=C du propylène qui permet au monomère de former deux liaisons covalentes simples avec d'autres atomes de carbone. Cette réaction de polymérisation nécessite l'utilisation d'un catalyseur au sein du milieu réactionnel. Le catalyseur est destiné à permettre à la réaction d'avoir lieu avec un rendement acceptable industriellement et dans un volume et un temps limités.

Les chaînes de polypropylène peuvent être de longueur variable. Plus la chaîne est courte, plus le polymère obtenu sera fluide. On parle de Melt Flow Index (MFI) ou Indice de Fluidité pour caractériser la viscosité du matériau. Moins le polymère est visqueux, plus élevé est son MFI. Il existe une multitude de polypropylènes caractérisés par différents MFI.

La quantité d'hydrogène introduite dans le réacteur de polymérisation du propylène sera déterminante pour la longueur des chaînes organiques obtenues et par conséquent la viscosité du produit. Plus on injecte d'hydrogène dans le réacteur, plus les chaînes seront courtes et donc plus le MFI sera élevé dans la mesure où la fixation d'un atome d'hydrogène supplémentaire à un atome de carbone en fin de chaîne vient clôturer cette dernière.

## Contraintes rencontrées

Les variations de pression et température sont limitées de par les contraintes physiques du réacteur, ce qui conduit inexorablement à une quantité maximale d'hydrogène qui peut être introduit dans le milieu réactionnel de la phase de polymérisation.

En sortie du réacteur, le polypropylène est envoyé vers une phase d'extrusion. Un moteur de plusieurs MW de puissance entraîne des vis d'Archimède dans lesquelles sont mélangés le polypropylène ainsi que différents additifs dont certains destinés à augmenter la fluidité du produit obtenu.

De manière logique, moins le fluide circulant dans l'extrudeuse est visqueux, moins de force et donc moins d'énergie seront nécessaires pour le pousser au travers de ce mécanisme.

## Optimisation réalisée

Dans le processus de production des polypropylènes les plus fluides, le catalyseur de la réaction de polymérisation a été remplacé par un autre catalyseur permettant d'obtenir des chaînes plus courtes pour une quantité d'hydrogène donnée.

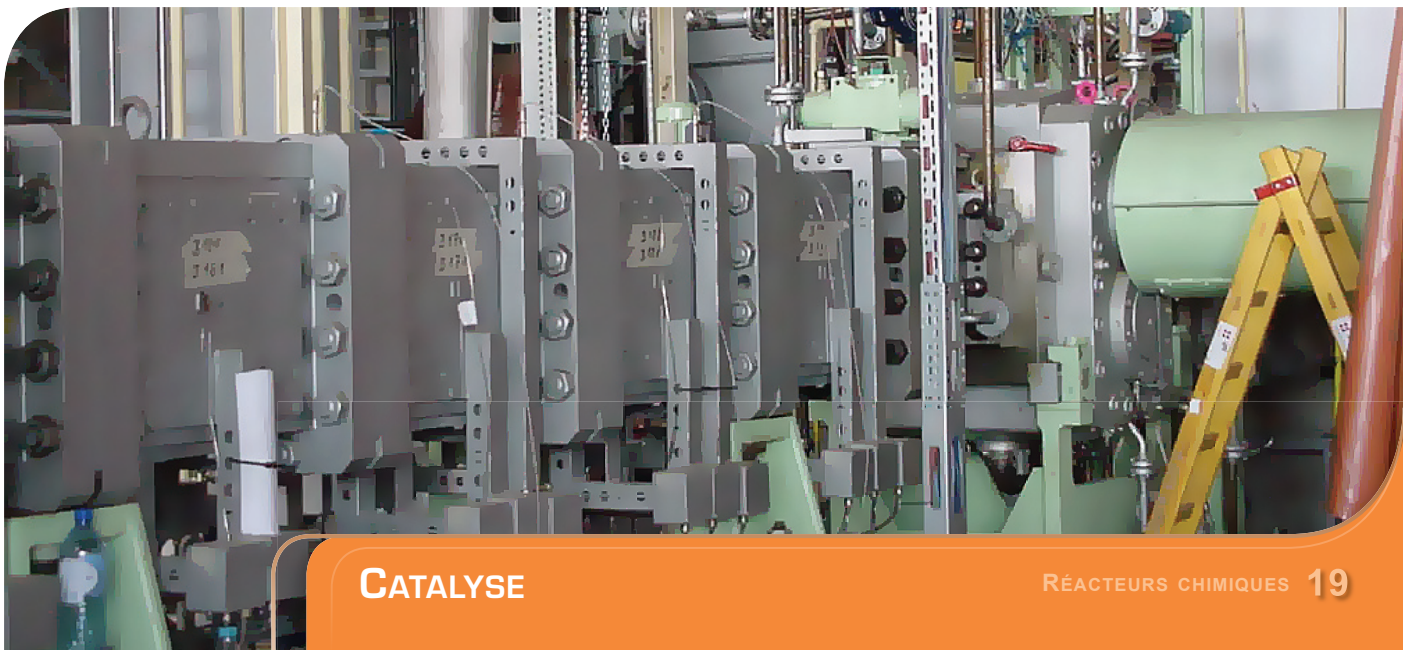
Résultat : Les contraintes physiques du réacteur ont été contournées. Le polymère obtenu en sortie de réacteur est plus fluide qu'auparavant.

Conséquence : Le moteur de la phase d'extrusion consomme moins d'énergie spécifique par tonne de matière traitée.

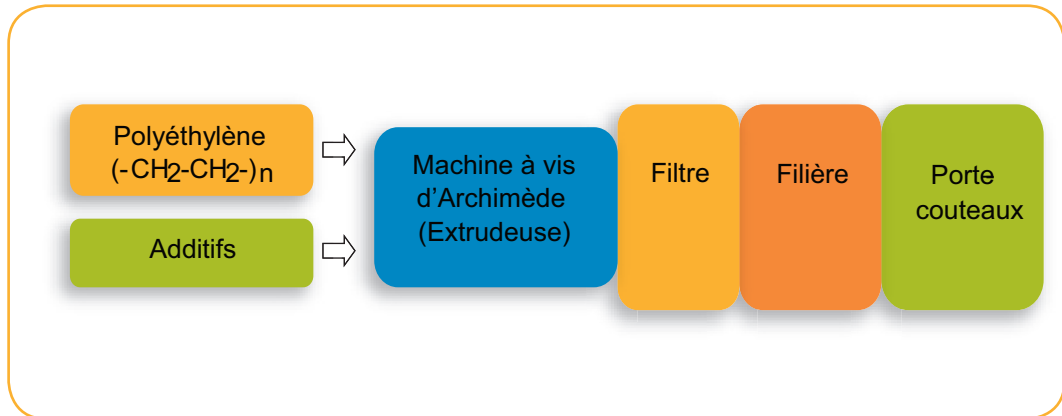
Le changement de catalyseur en chiffres (au niveau de la phase d'extrusion) :

Consommation énergétique spécifique AVANT changement	160 kWhé / tonne PP
Consommation énergétique spécifique APRES changement	150 kWhé / tonne PP
Gain énergétique spécifique	10 kWhé / tonne PP
Production annuelle de ce type de PP	50 000 tonnes / an
Economie consommation électrique totale	500 000 kWhé / an
Economie financière (hypothèse : 80 €/MWhé)	40 000 € / an

Catalyse. Source : Total



## Augmentation de la porosité du maillage du filtre en sortie de la phase d'extrusion dans le processus de fabrication du polyéthylène (-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>)<sub>n</sub> chez Total Petrochemicals



Phases d'extrusion du PolyEthylène (PE)

### Vos filtres sont-ils performants ?

Il est souvent intéressant de se poser la question de l'encrassement du filtre, du degré de filtration voire même de l'utilité du filtre puisque celui-ci, en créant des pertes de charge dans l'installation, engendre des consommations d'énergie supplémentaires.

### Description de l'installation d'extrusion du PolyEthylène (PE)

L'extrudeuse est une machine à vis d'Archimède qui fait avancer les granules ou la poudre de plastique, les chauffe tout en les mettant sous pression afin d'obtenir une pâte homogène de polyéthylène en fusion. La pâte obtenue passe au travers d'un filtre avant d'être filée en « spaghettis » qui seront découpés au niveau du porte-couteaux. Au travers de son maillage plus ou moins fin, le filtre en sortie de l'extrudeuse offre une contre-pression face à la poussée du moteur actionnant la vis d'Archimède qui fait avancer et mélange le polyéthylène et ses additifs. Ce filtre est nécessaire pour arrêter certains solides demeurant dans la pâte et la contre-pression qu'il engendre est, dans une certaine mesure, utile à l'obtention d'un mélange de qualité.

### Description de l'optimisation réalisée :

La porosité du filtre a été maximisée, c'est-à-dire que la taille des trous du maillage a été revue à la hausse.

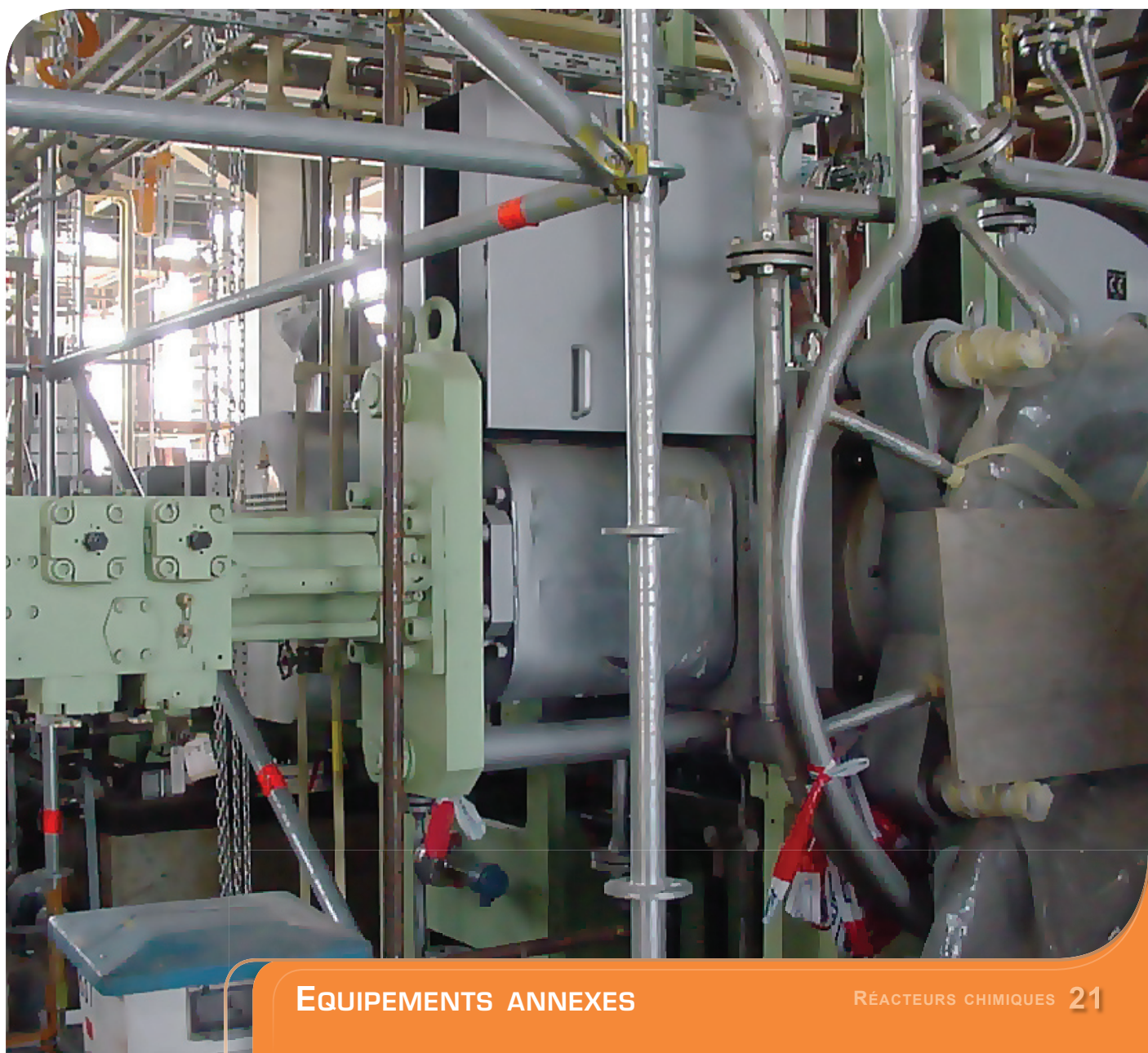
Résultat : Le filtre assure identiquement sa fonction principale mais offre une moindre résistance à la pression.

Conséquence : Le moteur actionnant la vis d'Archimède doit fournir moins d'énergie pour faire circuler les produits.

L'augmentation de la porosité du filtre en sortie d'extrudeuse en chiffres :

Consommation énergétique spécifique AVANT changement	250 kWhé / tonne PE
Consommation énergétique spécifique APRES changement	242 kWhé / tonne PE
Gain énergétique spécifique	8 kWhé / tonne PE
Production annuelle de PE	20 000 tonnes / an
Economie consommation électrique totale	160 000 kWhé / an
Economie financière (hypothèse : 80 €/MWhé)	12 800 € / an

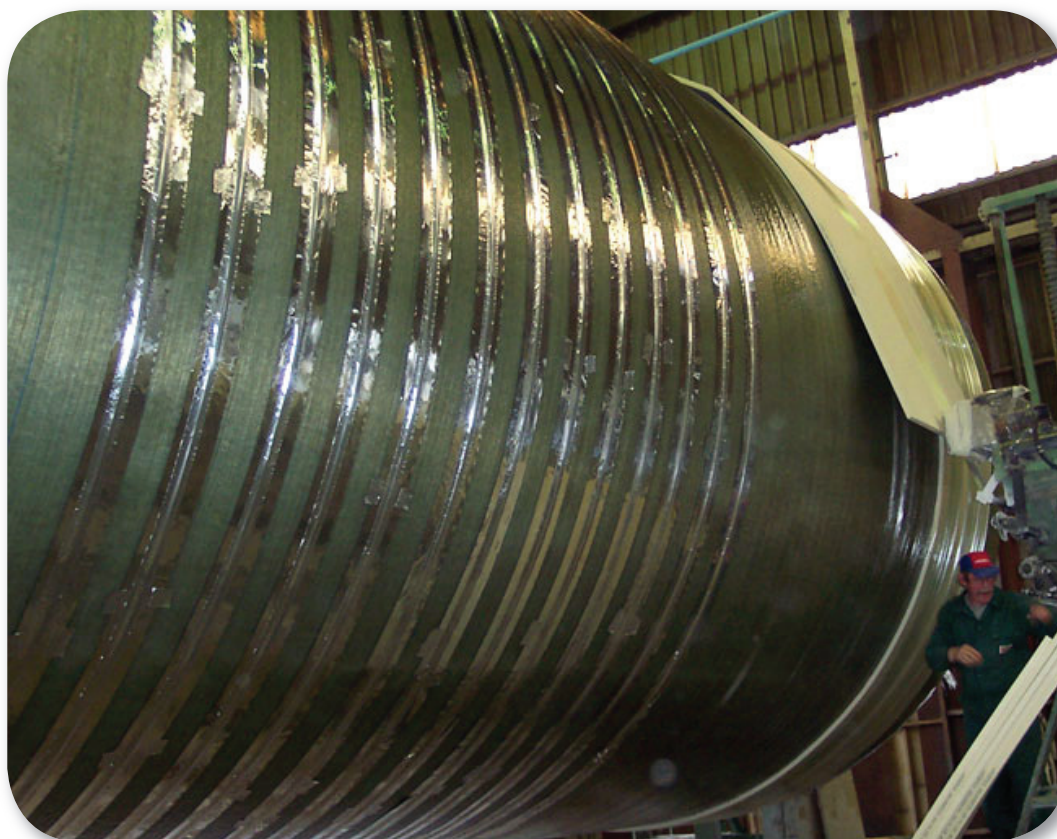
Filtration en fin de ligne d'extrusion du PolyEthylène (PE). Source : Total



## OPTIMISATIONS ENVISAGEABLES SUR LES REACTEURS CHIMIQUES

### Calorifugeage des réacteurs

Pensez à calorifuger vos réacteurs chimiques et à la maintenance de cette isolation thermique!



Calorifugeage. Source : CITP Europe.

## POUR PLUS D'INFOS...

Toutes ces optimisations sont envisageables dans votre entreprise dès que vous utilisez des réacteurs chimiques. Cette fiche vous donne une idée du potentiel d'optimisation mais l'étude et la mise en œuvre de ces mesures doivent souvent être réalisées par des spécialistes.

### Contacts

Spécialistes et fournisseurs d'équipements en Belgique :

Rechercher dans la base de données <http://www.abc-d.be/>

- Avec comme critère : Réacteur
- Autre critère plus spécifique : Agitation

Site Portail de l'Energie en Wallonie - <http://energie.wallonie.be> :

- Liste des bureaux d'audits agréés par la Région Wallonne
- Primes de la Région Wallonne
- Liens utiles sur les pages « Industrie » du site Portail

### Bibliographie :

Ont collaboré à la rédaction de ce cahier technique les différentes entreprises citées dans les études de cas et en sources photographiques.

P. TRAMBOUZE, Réacteurs Chimiques. Technologie. Techniques de l'Ingénieur, Génie des Procédés J4020

## COLOPHON

Opérateurs désignés par la Région wallonne :

**Institut de Conseil et d'Études en Développement Durable (ICEDD) asbl**

Boulevard Frère Orban 4, 5000 NAMUR

Contact : Dimitri Eggermont, Chargé de Recherches

Tél. : 081 25 04 80 — Fax : 081 25 04 90

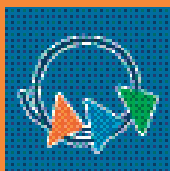
Courriel : [de@icedd.be](mailto:de@icedd.be)

**Econotec Consultants**

Rue des Guillemins 26 / 2<sup>e</sup> étage, 4000 LIÈGE

Contact : Fabienne Marchal , Consultant

Tél. : 04 349 56 18 — Fax : 04 349 56 10



Pour le compte de :

**Service public de Wallonie**

**Direction générale opérationnelle Aménagement du territoire,  
Logement, Patrimoine et Energie**

**Département de l'énergie et du Bâtiment durable**

Avenue Prince de Liège 7, 5100 Jambes

Tél : 081 33 56 40 — Fax : 081 33 55 11

Courriel : [Energie@spw.wallonie.be](mailto:Energie@spw.wallonie.be)

Site portail de l'énergie de la Région wallonne :

<http://energie.wallonie.be>



En partenariat avec :

**essenscia wallonie asbl** where chemistry meets life sciences Diamant

Building Boulevard Auguste Reyers, 80 B - 1030 Bruxelles

Tél : +32 2 238 98 51



Editeur responsable :

Dominique SIMON, Directeur.

Photo de couverture : " Réacteurs chimiques "

1<sup>ère</sup> diffusion électronique, édition septembre 2010

