

## Comment l'intégration des procédés peut-elle aider votre entreprise ?

L'intégration des procédés (IP) est une approche efficace qui permet de réduire la consommation d'énergie d'installations industrielles complexes et de grande envergure. Les techniques d'IP permettent de sélectionner ou modifier les étapes d'un procédé, ainsi que la façon dont ses différentes parties sont inter-connectées et interagissent, dans l'objectif de minimiser l'utilisation des ressources (principalement l'énergie, mais aussi l'eau et l'hydrogène). Parmi les techniques d'IP, l'analyse Pinch est celle qui est le plus fréquemment utilisée.

L'analyse Pinch est une procédure systématique pour étudier les flux énergétiques à l'intérieur d'un procédé et pour déterminer qu'elle est la **consommation minimale d'énergie requise pour le chauffage et le refroidissement de ce même procédé**. Cette dernière information est très utile parce qu'elle permet de comparer la consommation d'énergie actuelle d'une usine avec sa cible de consommation minimale et ainsi déterminer quel est le véritable potentiel d'amélioration. La méthode permet donc d'étalonner la consommation d'énergie de l'usine par rapport à sa consommation minimale possible. La méthode est également très utile pour identifier le potentiel de cogénération d'électricité et de chaleur sur un site ainsi que les possibilités d'y utiliser des pompes à chaleur.

Une fois la cible de consommation minimale d'énergie identifiée, l'analyse Pinch peut alors être utilisée pour identifier les projets d'économie d'énergie qui permettront de se rapprocher le plus possible de cette valeur cible en pratique. Les projets identifiés peuvent être à l'intérieur des différents procédés ou au niveau des utilités (production et distribution de vapeur, systèmes de refroidissement, etc.) d'un site industriel. Les résultats d'une analyse d'IP peuvent constituer la base d'une stratégie d'investissement à long terme.

Les aspects généralement inclus dans un audit énergétique conventionnel (vérification du rendement des chaudières, des systèmes d'air comprimé, de l'isolation thermique, des purgeurs de vapeur, etc.) peuvent être inclus dans une étude d'IP de façon à effectuer une analyse globale et systématique de l'ensemble d'une usine. Il est essentiel d'utiliser des logiciels spécialisés qui permettent de traiter le grand nombre de données nécessaires à une analyse d'IP. Il existe des logiciels d'analyse permettant de calculer rapidement le potentiel d'économies d'énergie d'un site industriel (valeur cible) et d'aider les ingénieurs lors de la conception des projets de récupération d'énergie permettant de se rapprocher le plus possible de la valeur cible.

Pour bien appliquer les techniques d'IP, il est essentiel d'avoir une bonne expérience dans leur utilisation ainsi qu'une bonne connaissance des procédés du secteur industriel dans lequel on les applique. Le moment idéal pour appliquer les techniques d'IP est à l'étape de conception d'une nouvelle unité de production ou d'une nouvelle usine. De très bonnes économies d'énergie pourront alors être obtenues en plus de réduire les investissements en capital de la nouvelle usine.

Pour les usines existantes, les projets d'économies d'énergie identifiés à l'aide des techniques d'IP nécessiteront généralement des investissements. Dans ce cas, l'étude d'IP peut être spécifiquement orientée de façon à maximiser le retour sur investissements des projets proposés.

L'approche utilisée dans une étude d'IP permet de s'assurer que les combinaisons de projets possibles sont évaluées simultanément de façon à s'assurer qu'il n'y ait pas de conflit entre ces projets et que les économies d'énergie ne soient pas comptées deux fois. La stratégie d'investissement des projets identifiés permettra de s'assurer que l'implantation des projets se fera de façon cohérente et avec une bonne synergie entre les projets retenus.

Que ce soit pour une nouvelle usine ou pour une usine existante, une étude d'IP faite à l'aide de l'analyse Pinch débute normalement par la réalisation d'un bilan de matière et d'énergie représentant chaque procédé de l'usine. Un modèle est alors effectué à partir de ce bilan de façon à représenter la charge thermique requise pour le chauffage et le refroidissement de chaque courant du procédé. On peut alors déterminer :

- Les cibles de consommation minimale d'énergie pour le refroidissement et le chauffage d'un procédé (vapeur, eau de refroidissement, charges frigorifiques, etc.) ;
- Les possibilités de combler la demande énergétique des courants de procédé en récupérant l'énergie contenue dans d'autres courants du procédé ;
- Les améliorations possibles à la façon dont les utilités (*vapeur à différents niveaux de pression, eau de refroidissement, électricité, etc.*) sont utilisées pour chauffer ou refroidir certains courants du procédé ;
- Les possibilités de modifier certains équipements / opérations du procédé existant pour réduire encore davantage la demande d'énergie du site.

En parallèle à une étude d'IP, on peut modéliser le système de production et de distribution de vapeur du site. Grâce à ce modèle, les économies d'énergie identifiées dans les procédés de l'usine peuvent être directement traduites en économies d'énergie achetée (gaz, huile, etc.). Cela permet d'éviter une erreur courante qui consiste à recommander des projets d'économies d'énergie en un point de l'usine qui peuvent en fait reporter le problème ou même créer un problème en un autre point du site. Un exemple typique d'une telle erreur est d'économiser de la vapeur à basse pression à un certain endroit de l'usine et, comme conséquence, d'être obligé de rejeter à l'atmosphère un surplus de vapeur à basse pression à un autre point de l'usine.

Le tableau suivant présente les économies typiques pouvant être obtenues, à l'aide des techniques d'IP (principalement l'analyse Pinch), sur la consommation totale d'énergie thermique achetée d'un site industriel (sauf pour le secteur des pâtes et papiers où les économies sont exprimées en fonction de la quantité totale de vapeur produite par l'ensemble des chaudières). Ces économies sont classées en fonction de la période de retour sur investissements (PRI).

Potentiel d'économies d'énergie via l'IP (%)				
Secteur industriel	Retombées immédiates	PRI de 1 à 3 ans	PRI de 3 à 6 ans	Potentiel Total *
Raffinage de pétrole	jusqu'à 5	10-15	jusqu'à 15	10-25
Pétrochimie	jusqu'à 5	5-10	jusqu'à 20	10-25
Sidérurgie	jusqu'à 5	5-15	10-20	10-30
Chimie	jusqu'à 5	10-15	jusqu'à 25	15-35
Agroalimentaire	5	15-25	jusqu'à 25	15-40
Pâtes et papiers	5	10-25	25	10-35

\* Le potentiel total d'économies n'est pas simplement la somme de toutes les colonnes parce que certains projets à longue période de retour sur investissements peuvent être une alternative à des projets ayant une plus courte période de retour sur investissements.

Des économies additionnelles variant entre 5 et 15% peuvent généralement être obtenues en effectuant une bonne maintenance des procédés et équipements, en vérifiant régulièrement les purgeurs à vapeur et le contrôle des chaudières et des fournaies, en nettoyant les échangeurs de chaleur encrassés, en effectuant un suivi régulier de la consommation d'énergie, en effectuant des modifications aux procédés, etc. Les économies possibles dépendent de l'importance qui a été donnée à la réduction de la consommation d'énergie par le personnel de l'usine ainsi qu'à d'autres facteurs comme la complexité du procédé et le type de produits traités dans l'usine.

Le texte qui suit traite de l'application de l'IP dans l'industrie agroalimentaire et présente quelques résultats typiques découlant d'études d'IP menées dans ce secteur. Il s'agit d'informations basées sur une expérience accumulée au niveau mondial. Les résultats sont typiques et non-corrigés en fonction des particularités économiques, géographiques ou climatiques locales.

### Application de l'IP dans l'industrie agroalimentaire

La qualité de la production est une préoccupation constante dans le secteur agroalimentaire. Naturellement, cette préoccupation conduit à une résistance à des changements dans la conduite d'un procédé, dans la crainte que cela n'affecte la qualité des produits. Cependant, une analyse d'IP peut très bien être menée en évitant de proposer des modifications qui pourraient nuire à la qualité des produits.

Dans l'industrie agroalimentaire, on trouve des procédés discontinus et continus. Une analyse d'IP peut s'appliquer aussi bien à des procédés discontinus, semi-continus que continus, et fournir dans tous les cas, des résultats pratiques et réalistes. Dans un procédé discontinu ou semi-continu les économies d'énergie peuvent nécessiter un stockage thermique si, dans le procédé, les besoins de chaleur n'arrivent pas en même temps qu'un rejet thermique. De plus, en modifiant la séquence des opérations d'un procédé discontinu (« process scheduling »), on peut non seulement augmenter les possibilités de récupération d'énergie, mais on peut également identifier des opportunités d'augmenter la capacité de production. Dans les procédés en continu, les économies d'énergie peuvent être obtenues par une récupération directe de chaleur entre les différents flux de matières

intervenant dans le procédé. On peut aussi utiliser de nouveaux systèmes de récupération d'énergie comme une boucle d'eau chaude (récupération indirecte).

Une analyse d'intégration des procédés doit s'intéresser plus particulièrement aux opérations suivantes :

- Évaporation, concentration, distillation ;
- Séchage ;
- Pasteurisation ;
- Cuisson, brassage, etc. ;
- Réfrigération ;
- Nettoyage des équipements et de la tuyauterie.

### Types de production et taille des installations pouvant bénéficier d'une analyse Pinch

L'IP peut généralement être appliqué dans tous les secteurs d'activités de l'industrie agroalimentaire. De nombreux exemples se retrouvent dans les brasseries, les distilleries, les sucreries, les laiteries ainsi que dans la production de produits laitiers, de dérivés céréaliers, d'amidon ou d'huiles alimentaires.

Une étude d'IP peut être menée de manière avantageuse dans des usines qui utilisent aussi peu de vapeur que 10 t/h ou 22 000 livres/h (l'équivalent de 1,5 M\$/an de gaz naturel au coût de 0,23 \$/m<sup>3</sup> avec une efficacité de production et de distribution de la vapeur de 70 %). Cet ordre de grandeur dépend de la complexité du procédé et de la façon dont la vapeur est utilisée. Ainsi, on aura plus de difficultés à obtenir des économies d'énergie intéressantes dans les usines qui utilisent moins de vapeur ou qui utilisent l'essentiel de la vapeur dans des équipements spécialisés comme des réacteurs à double enveloppe, des évaporateurs, des éjecteurs, des rebouilleurs ou pour l'entraînement de turbines ou l'alimentation de serpentins dans des réservoirs. En effet, il est généralement difficile de remplacer la vapeur utilisée dans ce type d'équipements par de la chaleur récupérée dans le procédé.

### Avantages de l'IP

En Amérique du Nord, l'investissement dans des projets d'économie d'énergie n'a pas été, jusqu'à présent, une priorité pour les industriels. Au Canada, la récente ratification du protocole de Kyoto devrait augmenter progressivement l'intérêt des entreprises envers l'efficacité énergétique. L'intégration des procédés, associée à un audit énergétique conventionnel et à un suivi méticuleux de la consommation d'énergie, est probablement la meilleure approche qui puisse être utilisée pour générer d'importantes économies d'énergie et réduire les émissions de GES.

L'IP est particulièrement efficace lors de la conception d'un nouveau procédé ou lorsque des modifications majeures doivent être apportées à une unité de production. À cette étape du développement du projet, il est possible de réduire à la fois la consommation d'énergie et les coûts en capital. Les économies en capital résultent principalement de la réduction de la capacité de

nouvelles chaudières et des nouveaux équipements de chauffage et de refroidissement. L'IP est également très efficace pour réduire une charge excessive sur les chaudières, les fournaies et les systèmes d'eau de refroidissement dans les usines existantes.

L'IP peut conduire aux résultats suivants :

- Des projets à retombées immédiates ou rapides, nécessitant de faibles investissements et permettant d'économiser jusqu'à 15 % des coûts d'énergie ;
- Des projets ayant un temps de retour sur investissements moyen (moins de 3 ans) permettant d'économiser jusqu'à 20% d'énergie supplémentaire;
- Des projets ayant un temps de retour sur investissements plus long (4 à 6 ans) pouvant générer des économies d'énergie additionnelles jusqu'à 20 % des coûts totaux d'énergie de l'usine.

Globalement, les économies d'énergie identifiées au cours d'une étude d'IP dans l'industrie agroalimentaire sont généralement compris entre 15 et 40% des coûts d'achat du combustible.

Un récent suivi des interventions en IP dans le secteur agroalimentaire montre qu'entre 50 et 75 % des recommandations proposées sont implantées. Celles-ci comprennent généralement les projets à retombées immédiates et les projets les plus attrayants parmi ceux qui présentent un temps de retour sur investissements moyen. Les projets ayant de plus longs temps de retour sur investissements concernent souvent les systèmes d'utilités tel que le remplacement d'une chaudière ou l'ajout d'une turbine à gaz. Ces projets sont plus souvent implantés s'ils procurent d'autres bénéfices (hausse de production, évitement d'une dépense en capital, sécurité de l'approvisionnement électrique, etc.) que les économies d'énergie qu'ils procurent, ce qui peut alors les rendre plus intéressants que d'autres projets déjà envisagés dans l'usine. Dans le cas d'une modification à une usine existante, la configuration du site, les matériaux à utiliser, et la possibilité de maintenir la production et l'exploitation pendant les travaux sont des facteurs très importants pour la viabilité économique d'un projet d'amélioration de l'efficacité énergétique.

Les bas coûts de l'énergie au cours des dernières décennies et l'accès limité aux capitaux sont les principales raisons expliquant les taux d'implantation relativement bas des projets identifiés lors d'une analyse d'IP. La prédominance accordée à la qualité de la production, l'amélioration des produits et le respect des normes environnementales sont d'autres facteurs déterminants. Avec la mise en place du protocole de Kyoto, on peut s'attendre à ce que les projets ayant de plus longs temps de retour sur investissements soient progressivement acceptés plus fréquemment.

### Approche utilisée pour réaliser une étude d'IP

Une étude d'IP est généralement séparée en deux phases : une phase où les cibles de consommation minimale d'énergie pour le chauffage et le refroidissement du procédé sont déterminées, puis une phase de conception des projets de réduction de la consommation d'énergie. Que ce soit pour une unité individuelle de production ou à l'échelle d'un site industriel d'envergure, la première phase du travail consiste à identifier le potentiel d'économies d'énergie avant même d'entreprendre la conception des projets qui permettront de réaliser ces économies. Cette première phase repose généralement sur un bilan de masse et d'énergie obtenu à partir de paramètres d'exploitation et, au besoin, de données de simulation. Les données nécessaires sont typiquement les débits de matière et les températures en différents points du procédé, ainsi que les charges thermiques échangées à travers les principaux échangeurs de chaleur, le tout dans des conditions normales d'exploitation. Lorsqu'ils sont disponibles, les coefficients de transfert de chaleur sont également nécessaires pour identifier approximativement les investissements nécessaires pour réaliser en pratique le potentiel d'économies d'énergie identifié (de grands coefficients de transfert de chaleur impliquent de plus petits échangeurs de chaleur et donc de plus petits investissements et vice-versa). Lorsque cela est possible, une collecte de données sur site est réalisée pour réconcilier les données conflictuelles. Il est également important de connaître les coûts de production de la vapeur et les critères d'investissements acceptables par les dirigeants de l'usine. Dans la seconde phase de l'étude, des techniques systématiques sont utilisées pour concevoir les projets permettant d'atteindre les économies d'énergie identifiées dans la première phase. La conception des équipements, les paramètres d'exploitation et la configuration du site industriel sont alors évalués avec plus de détails pour permettre d'estimer les coûts d'implantation des projets pour chaque unité de production du site et pour établir quel est le potentiel d'économies d'énergie effectivement réalisable en pratique.

Dans l'industrie agroalimentaire, l'utilisation de l'eau peut avoir un impact majeur sur les résultats d'une étude d'IP car les consommations d'eau et d'énergie sont souvent intimement liées dans les procédés utilisant de grandes quantités d'eau. Dans de tels procédés, avant de procéder à une quelconque analyse d'IP, il est nécessaire de bien comprendre le bilan de l'utilisation d'eau pour chaque type de production. Cet exercice permet souvent d'identifier des mesures d'efficacité énergétique à retombées immédiates qui peuvent conduire à une utilisation plus rationnelle de l'eau.

### Livrables d'une étude d'IP

Les livrables d'une analyse d'IP dépendent de plusieurs facteurs tels que la taille, la complexité et les problématiques de l'usine dans laquelle elle est réalisée ainsi que les exigences de la direction de l'usine. Les principaux livrables comprennent généralement :

- Une évaluation de la consommation énergétique actuelle de chaque procédé ;
- Un bilan de masse et d'énergie de chaque procédé incluant une simulation lorsque requis ;
- Les cibles de consommation minimale d'énergie pour le chauffage et le refroidissement des procédés ;

- Une liste des mesures d'économies d'énergie à l'intérieur de chaque procédé ou entre les procédés, ainsi que les projets permettant de réduire l'utilisation des formes coûteuses d'énergie (par exemple, de la vapeur à haute pression) au profit de l'utilisation de formes plus abordables (par exemple, de la vapeur à plus basse pression) ;
- Une évaluation et une optimisation de la configuration actuelle des utilités incluant le choix des entraînements (turbine à vapeur ou moteur électrique), les niveaux de pression de vapeur, le potentiel de production d'électricité sur le site, la minimisation des purges de vapeur dans le réseau et les stratégies pour réduire au minimum l'utilisation des torchères ;
- L'évaluation précise des coûts marginaux de production de vapeur, d'électricité et de force motrice ;
- La simulation du réseau de vapeur et de condensat pour évaluer l'impact des projets envisagés et pour en quantifier précisément les économies d'énergie ;
- L'ingénierie préliminaire des projets incluant l'évaluation de leur coût ;
- Une stratégie d'investissements pour les projets d'économie d'énergie identifiés.

Généralement, les livrables prennent la forme d'un rapport incluant des schémas et tableaux pour expliquer chacun des projets recommandés. Les bilans de masse et d'énergie ainsi que les simulations sont, quant à eux, remis sous forme de fichiers électroniques.

### Projets typiques identifiés lors d'une étude d'IP

Les projets rentables qui sont identifiés dans une étude d'IP sont propres à chaque site industriel et dépendent de plusieurs paramètres : la taille et la configuration de l'usine, le coût de l'énergie, la disposition et les distances que doit parcourir la tuyauterie, les contraintes d'espace, les limites aux paramètres d'exploitation et les difficultés supplémentaires entraînées par les exigences de sécurité ou d'autres facteurs pouvant influencer le projet. Les temps de retour sur investissements présentés ci-dessous peuvent être plus courts pour les grands sites industriels si des économies d'échelle peuvent être réalisées et si les coûts de l'énergie continuent d'augmenter. La liste ci-dessous fournit quelques projets typiques :

- Projets à retombées immédiates ou avec un temps de retour sur investissements rapide (typiquement moins de 1 an) :
  - Amélioration du fonctionnement des systèmes de réfrigération, par exemple, en ajustant la pression du compresseur en fonction de la température ambiante ;
  - Optimisation de la gestion de l'eau chaude (par exemple, en ajustant l'alimentation d'eau chaude à la demande) ;
  - Amélioration du rendement des évaporateurs (par exemple, en éliminant plus efficacement les gaz non condensables) ;

- Projets à temps de retour sur investissements moyen (typiquement de 1 à 3 ans) :
  - Modification de l'instrumentation et amélioration des boucles de contrôle ;
  - Optimisation des systèmes de réfrigération (par exemple, en augmentant la pression du réfrigérant, dans les limites d'exploitation) ;
  - Récupération de chaleur pour préchauffer les flux de matière alimentant les concentrateurs ;
  - Récupération additionnelle de chaleur par un meilleur usage des échangeurs de chaleur existants ou en augmentant leur surface d'échange (par exemple, nouvelle calandre, ajout de plaques) ;
  - Meilleure exploitation de la vapeur à faible pression provenant d'un évaporateur à effet multiple ;
  - Récupération d'énergie des stérilisateurs en utilisant un stockage thermique ;
  - Récupération et renvoi des condensats de vapeur vers la chaufferie ;
  - Préchauffage des eaux de lavage par récupération de chaleur ;
  - Préchauffage de l'air des séchoirs par récupération de chaleur.
- Projets à rentabilité à plus long terme (typiquement de 3 à 6 ans) :
  - Récupération indirecte de chaleur au moyen d'une boucle d'eau chaude ;
  - Récupération des vapeurs produites par l'ébullition des produits ;
  - Récupération de chaleur dans les rejets de gaz chauds des séchoirs ;
  - Cogénération de vapeur et d'électricité en utilisant par exemple une turbine à gaz, une turbine à vapeur ou les deux (cycle combiné) ou encore des moteurs thermiques au diesel, à essence ou au gaz naturel ;
  - Ajout d'un récupérateur de chaleur des gaz de combustion des chaudières (le temps de retour sera plus court sur les chaudières à vapeur ayant une capacité de l'ordre de 30 t/h et plus) ;
  - Recompression mécanique de vapeur (effet de pompe à chaleur) ;
  - Optimisation du rendement des évaporateurs en augmentant le nombre des évaporations successives en cascade (évaporateurs à effets multiples).

## Erreurs les plus fréquentes dans l'application de l'analyse Pinch (présentées sans ordre particulier)

Les erreurs les plus fréquentes lors de la réalisation d'une analyse Pinch sont :

- Essayer de réaliser seulement les projets les plus rentables en premier. Ceci mène généralement à des économies d'énergie bien plus faibles parce que certains projets ayant une période de retour sur investissements plus longue sont incompatibles avec les projets à très courte période de retour, ce qui empêchera leur implantation future ;
- Négliger les changements possibles sur un horizon de 2 à 5 ans (changements à la législation, remplacement futur d'équipements, croissance de la production, etc.) résulte souvent en des projets qui, par le temps nécessaire au personnel de l'usine pour les implanter, seront désuets ou n'entraîneront pas les économies d'énergie attendues ;
- Négliger les changements possibles au procédé. Dans bien des cas, de simples changements au procédé peuvent entraîner de substantielles économies supplémentaires. Cependant, l'évaluation des modifications possibles à un procédé complexe comme ceux des raffineries nécessite, de la part du spécialiste en analyse Pinch, une excellente connaissance de ce type de procédé ;
- Ne pas travailler en étroite collaboration avec le personnel de l'usine. Cela conduit à des projets qui ne seront pas implantés ou qui n'auront pas bien été compris ;
- Faire uniquement un bilan énergétique du réseau de vapeur et commencer l'analyse Pinch à partir de celui-ci. Cette démarche ne conduira généralement pas à l'identification de tout le potentiel des économies d'énergie et peut même conduire à des erreurs importantes ;
- Se tromper dans l'établissement du coût marginal d'utilisation de certains équipements en considérant leur coût moyen plutôt que leur coût réel, notamment pour :
  - Le maintien d'une chaudière en opération considérant sa consommation énergétique minimale ;
  - L'utilisation de moteurs par rapport à un entraînement par une turbine à vapeur ;
- Oublier de tenir compte de certains aspects dans l'établissement réel des coûts d'opération, notamment :
  - Le combustible utilisé dans les chaudières et servant au contrôle de la pression dans le réseau de vapeur ;
  - Les changements dans le coût d'opération des chaudières et des turbines suite à une amélioration de leur contrôle ;
  - Les variations de production en fonction des tarifs variables des coûts de l'électricité (par exemple utilisation plus intensive de certains procédés durant la nuit en période hors-pointe).